



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

**PROPUESTA PARA INSTALAR UN CENTRO DE PROCESAMIENTO DE LA
FRACCIÓN INORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA LAS
CEMENTERAS EN EL ESTADO DE HIDALGO**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
I.C. JORGE EMIGDIO SÁNCHEZ PÓLITO

TUTOR:
DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE DE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Simón González Martínez
Secretario: M. A. I. Landy Irene Ramírez Burgos
Vocal: Dra. Georgina Fernández Villagómez
1er. Suplente: M.I. Alba Beatriz Vázquez González
2do. Suplente: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Edificio 5 del Instituto de Ingeniería de la UNAM y en el estado de Hidalgo.

TUTOR DE TESIS:

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

FIRMA

*El futuro que visualizamos
ilumina en el presente
la responsabilidad de transformar
nuestra manera de pensar y actuar
en beneficio de la madre tierra*

DEDICATORIAS

A mis amados padres, Alejandra y Jorge, por ser mi principal inspiración para salir adelante en cada uno de los retos que me he propuesto, por brindarme todo su apoyo y cariño a lo largo de mi vida y formación académica. Me enseñaron que la perseverancia, disciplina y respeto son las herramientas principales para cumplir tus metas y sueños.

A toda mi familia por cada palabra de aliento y motivación que me brindaron desde el comienzo y a lo largo de esta nueva etapa de mi vida.

A Edith mi compañera de vida por todo su cariño, apoyo y motivación para juntos preservar y mejorar el ambiente.

A todos mis amigos de la maestría por todo su apoyo, consejos, enseñanzas y vivencias compartidas a lo largo de todo esta etapa, de manera especial a Carolina Silva, Liz Cruz, Zulma Barreto, Mayanin Ramírez, Roxana Martínez, Astrid Quintero, Nereyda Treviño, Martín Gómez, Santiago Querol, Fidel González, Osiel Mendoza, Oscar Arroyo, José Luis, Erick Pech, Mauricio Tarazona, Esperanza Aquino, Javier Avilés y Aurora Rivera.

A mis amigos de Guerrero, Zuly Cruz, Leslie Jiménez, Luz María Morales, Nora Aguiluz, Lupicino García, David Moras porque a pesar de la distancia siempre me brindaron su apoyo y amistad.

Finalmente a Dios por darme la oportunidad de desarrollar y culminar este trabajo y contribuir en el desarrollo de un futuro mejor para todos.

RECONOCIMIENTOS

De manera especial:

- ❖ Dra. María Neftalí Rojas Valencia, le agradezco por darme la confianza y permitirme trabajar con usted, por el gran apoyo que me brindo a lo largo de toda la maestría y las incontables recomendaciones que me permitieron la realización y mejora continua del presente trabajo y mi desarrollo profesional.

De igual manera a mi jurado de examen de grado que con sus comentarios y consejos me han permitido crecer como profesional y por brindarme parte de su valioso tiempo para mejorar la realización y consolidación de este trabajo:

- ❖ Dra. Georgina Fernández Villagómez, por sus consejos y enseñanzas a lo largo de toda la maestría.
- ❖ M.I. Alba Beatriz Vázquez González, por sus valiosas asesorías y recomendaciones en cada evaluación, que permitieron mejorar continuamente el desarrollo del trabajo.
- ❖ Dr. Simón González Martínez, por sus puntuales observaciones desde la primera revisión de este trabajo que permitió mejorarlo en diferentes aspectos.
- ❖ M. A. I. Landy Irene Ramírez Burgos, por aportar su experiencia y tiempo en la revisión de este trabajo.

M.I. Juan Antonio Araiza Aguilar, por sus asesorías brindadas para lograr el desarrollo de la Evaluación Multicriterio a través de los Sistemas de Información Geográfica.

M.I. Soler Anguiano Francisca Irene, por su ayuda en el desarrollo de los cálculos para las proyecciones de población y residuos en el estado de Hidalgo.

MSc. Oscar Javier Suarez Medina, por permitirme trabajar con usted, por brindarme su apoyo, consejos y compartir sus experiencias enriquecedoras en la gestión de residuos en Colombia y en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme la beca a partir de la cual pude realizar mis estudios de maestría.

Ing. Enrique De Hoyos Guajardo y al Lic. Eduardo González Alba, director de sustentabilidad y combustibles alternos de CEMEX por las atenciones que tuvieron a lo largo de la tesis.

A mis compañeros que me ayudaron en la realización de las encuestas en Hidalgo: Carolina Silva, Lizbeth Cruz, Elsa Galeana, Piero Botton, Lilia León, Erick Pech y Mauricio Tarazona.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y darme las herramientas para ampliar y enriquecer mi formación académica y profesional.

CONTENIDO

Página

DEDICATORIAS.....	II
RECONOCIMIENTOS.....	III
TABLA DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 <i>Justificación</i>	10
1.2 <i>Objetivos</i>	12
1.3 <i>Alcances</i>	12
2. ANTECEDENTES.....	13
2.1 Combustibles derivados de los residuos (CDR).....	13
2.1.1 <i>Valorización energética de los residuos sólidos como combustibles alternos en el ámbito internacional</i>	14
2.1.2 <i>Valorización energética de los residuos sólidos como combustibles alternos en el ámbito nacional</i>	19
2.2 Gestión y procesamiento de los RSU en México.....	24
2.2.1 <i>Componentes de la gestión integral de residuos sólidos</i>	26
2.2.2 <i>Separación y procesamiento de residuos</i>	32
3. MARCO LEGAL Y TEÓRICO.....	36
3.1 Marco legal.....	36
3.1.1 <i>República Mexicana</i>	36
3.1.2 <i>Estado de Hidalgo</i>	40
3.2 Coprocesamiento y poder calorífico de los RSU utilizados como combustibles alternativos en hornos cementeros.....	41
3.2.1 <i>Coprocesamiento de RSU</i>	42
3.2.2 <i>Poder calorífico de los residuos</i>	47
3.2.3 <i>Estudios acerca de los beneficios ambientales relacionados con el uso de residuos como combustibles alternativos</i>	50
4. METODOLOGÍA.....	52
4.1 Primera Fase. Revisión de la normativa y el estado del arte de la gestión integral de los RSU en la República Mexicana y en el estado de Hidalgo... ..	53
4.2 Segunda Fase. Localización de los sitios de manejo de RSU y plantas cementeras que operen en Hidalgo.....	53
4.3 Tercera Fase. Proyección de la generación de RSU en municipios con población mayor a 45 000 habitantes.	53
4.4 Cuarta Fase. Identificación y cuantificación de los RSU con alto poder calorífico.....	54
4.5 Quinta Fase. Análisis de las tecnologías y equipos que se requieren para la operación del CP-FIRSU.....	54
4.6 Sexta Fase. Georreferenciación de los sitios de manejo de residuos que proporcionarán los RSU al CP-FIRSU y las plantas cementeras.....	54
4.7 Séptima Fase. Evaluación multicriterio y análisis fuente-destino para evaluar y determinar la ubicación factible del CP-FIRSU.....	55

5. RESULTADOS	57
5.1 Normativa y estado del arte relacionado con el manejo de los RSU en Hidalgo	57
5.1.1 Normativa	57
5.1.2 Manejo de los residuos sólidos en el estado de Hidalgo	59
5.2 Cuantificación del poder calorífico de la FIRSU	66
5.3 Plantas cementeras y sitios de manejo de RSU en el estado de Hidalgo.	66
5.3.1 Plantas cementeras en el estado de Hidalgo	67
5.3.2 Sitios de manejo integral de RSU en el estado de Hidalgo	72
5.4 Coordinadas geográficas de las plantas cementeras y sitios de manejo de RSU..	78
5.5. Proyección de la población y residuos en los municipios del área de estudio.....	79
5.6. Análisis de la infraestructura que se requiere en un CP- FIRSU fijo en Hidalgo	82
5.6.1 Visitas técnicas	86
5.6.2 Descripción técnica de maquinaria y equipos que se emplearan en el CP-FIRSU	94
5.6.3 Modelación y oferta económica de la infraestructura del CP-FIRSU.....	112
5.7. Análisis para determinar la ubicación del sitio factible para instalar el CP-FIRSU..	117
5.7.1 Evaluación Multicriterio (EMC) en la selección de áreas factibles para ubicar el CP-FIRSU, empleando herramientas de SIG.....	117
5.7.2 Selección del sitio factible para la instalación del CP-FIRSU mediante un análisis origen- destino	129
6. CONCLUSIONES	145
7. RECOMENDACIONES	146
8. REFERENCIAS	147
ANEXOS	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Legislación a nivel nacional en materia de gestión de RSU	37
Tabla 3.2 Residuos inorgánicos con potencial de reciclaje.....	38
Tabla 3.3 Residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado	39
Tabla 3.4 Capacidad calorífica de RSU	48
Tabla 3.5 Capacidad calorífica de combustibles de uso común	49
Tabla 3.6 Emisiones medidas de la combustión de prueba de NFU en un horno cementero en España.....	50
Tabla 5.1 Criterios ambientales y técnicos que regulan las normas y manuales	59
Tabla 5.2 Proyecciones de población y generación de residuos en los estados de la megalópolis	60
Tabla 5.3 Municipios con mayor recolección de RSU y generación per cápita diaria	61
Tabla 5.4 Municipios que concentran los vehículos recolectores de RSU	62
Tabla 5.5 Poder calorífico de los RSU según se recolectan respecto a combustibles fósiles.....	65
Tabla 5.6 Resultados del análisis del poder calorífico a muestras de pacas FIRSU que llegan a las planta cementera de CEMEX en Huichapan, Hidalgo	66
Tabla 5.7 Evaluación de los ahorros generados por la sustitución de 15% de combustible por residuos	69
Tabla 5.8 Centros de acopio que operan actualmente en el estado de Hidalgo	73
Tabla 5.9 Coordinadas UTM de las plantas cementeras	78
Tabla 5.10 Coordinadas UTM de Rellenos Sanitarios municipales y la planta de selección Cambio Verde	79
Tabla 5.11 Coordinadas UTM de Rellenos Sanitarios regionales	79
Tabla 5.12 Procesos y equipos utilizados para el procesamiento de combustibles alternos	84
Tabla 5.13 Revisión económica de los equipos a implementar en el CP-FIRSU	115
Tabla 5.14 Ponderación y normalización de criterios generales y específicos.....	122
Tabla 5.15 Ventajas y desventajas de los terrenos en los tres puntos factibles de ubicación	135
Tabla 5.16 Encuestas aplicadas para evaluar la aceptación social en los tres puntos factibles	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 RSU generados por habitantes de países de la UE en el año 2012	14
Figura 2.2 Porcentaje de residuos destinados a vertederos en el año 2012 en países de la UE	15
Figura 2.3 Formas de gestión de los residuos en países de la UE en el año 2012.....	16
Figura 2.4 Producción de CDR en países de la UE en el año 2008	18
Figura 2.5 Estrategia implementada por CEMEX para el aprovechamiento de los RSU	20
Figura 2.6 FIRSU sometido a procesamiento	21
Figura 2.7 Sistema FIRSU en un sitio de disposición final.....	21
Figura 2.8 Compactación y atado de la FIRSU	23
Figura 2.9 Proceso del sistema FIRSU móvil.....	24
Figura 2.10 Separación primaria avanzada de residuos propuesta en la NADF-024-AMBT-2013	25
Figura 2.11 Manejo Integral de los RSU	26
Figura 2.12 Diagrama de flujo de la generación de los RSU en México.....	27
Figura 2.13 Diagrama de un sistema de manejo residuos sólidos con separación en fuente	32
Figura 3.1 Leyes y reglamentos que regulan el manejo de los RSU en México y en Hidalgo	41
Figura 3.2 Cálculo de la estimación del uso de combustibles alternativos en el mundo, en países desarrollados y en vías de desarrollo	44
Figura 3.3 Jerarquía de alternativas para el aprovechamiento de los residuos.....	45
Figura 3.4 Desarrollo del funcionamiento del coprocesamiento en plantas cementeras.....	46
Figura 3.5 Beneficios que aporta el coprocesamiento	47
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología	52
Figura 5.1 Composición de los RSU generados en Hidalgo	63
Figura 5.2 Diferentes tipos de RSU generados en los municipios de Hidalgo.....	63
Figura 5.3 Composición porcentual de los RME provenientes de 350 empresas manufactureras	64
Figura 5.4 Empresas cementeras que emplean el coprocesamiento en México.....	67
Figura 5.5 Localización de las plantas cementeras en Hidalgo	68
Figura 5.6 CEMEX planta Atotonilco, Hidalgo.....	69
Figura 5.7 CEMEX planta Huichapan, Hidalgo	70
Figura 5.8 Cementos Fortaleza Planta El Palmar	70
Figura 5.9 Cementos Fortaleza Planta Vito.....	71
Figura 5.10 Cementos Fortaleza Planta Tula.....	71
Figura 5.11 Cementos Cruz Azul Planta Tula de Allende	72
Figura 5.12 Planta de separación de residuos “Cambio Verde”	74
Figura 5.13 Infraestructura sanitaria para la disposición final de residuos en Hidalgo	75
Figura 5.14 Cantidad de residuos que reciben diariamente los rellenos sanitarios municipales.....	75
Figura 5.15 Cantidad de residuos que reciben diariamente los rellenos sanitarios regionales	76
Figura 5.16 Rellenos sanitarios municipales de Pachuca (a) y Zempoala (b)	76
Figura 5.17 Rellenos sanitarios regionales de Tula de allende (a) y Metepec (b)	77
Figura 5.18 Infraestructura para la operación y el manejo de los RSU en el estado de Hidalgo	78
Figura 5.19 Municipios con mayor número de población y generación de residuos	80
Figura 5.20 Proyección a 10, 20 y 30 años de la población en municipios de Hidalgo	80
Figura 5.21 Proyección a 10, 20 y 30 años de la generación de residuos en Hidalgo	81
Figura 5.22 Planta empacadora de pacas FIRSU en Iztapalapa.....	82
Figura 5.23 Diagrama de proceso básico de las pacas FIRSU para el aprovechamiento energético de los RSU.....	83
Figura 5.24 Croquis de distribución de la planta de selección San Juan de Aragón	86
Figura 5.25 Patio de recepción de residuos de la planta de selección San Juan Aragón	87
Figura 5.26 Fosa de depósito (a) y banda inicial de transporte de residuos (b)	88
Figura 5.27 Primera línea de selección manual de residuos valorizables	89
Figura 5.28 Separador magnético tipo Overband	89
Figura 5.29 Separación de la materia orgánica por el separador tipo Splitter	90
Figura 5.30 Compactación (a) y embolsado de la FIRSU (b)	90
Figura 5.31 Maqueta de la ET de Iztapalapa	91
Figura 5.32 Procesamiento de las pacas FIRSU	92
Figura 5.33 Propuesta inicial de la distribución en planta de la infraestructura del CP-FIRSU	93
Figura 5.34 Báscula de fosa Torrey	94

Figura 5.35 Cargador Frontal modelo CLG835.....	95
Figura 5.36 Grúa pedestal modelo COLMAR F63	95
Figura 5.37 Montacargas.....	96
Figura 5.38 Tolva de recepción	96
Figura 5.39 Transportador tipo PB	97
Figura 5.40 Componentes del transportador tipo PB	97
Figura 5.41 Abridor de bolsas TM 5000 E.....	98
Figura 5.42 Transportador tipo UP	99
Figura 5.43 Componentes del transportador tipo UP.....	100
Figura 5.44 Transportador tipo PA	101
Figura 5.45 Componentes del transportador PA.....	101
Figura 5.46 Trommel de cribado	102
Figura 5.47 Vista transversal del funcionamiento del Trommel	103
Figura 5.48 Vista interior del tambor de cribado de un Trommel modelo TR2.5/12/14	104
Figura 5.49 Componentes principales que conforman un Trommel modelo TR2.5/12/14	104
Figura 5.50 Separador electromagnético tipo Overband	105
Figura 5.51 Separador magnético tipo Overband	106
Figura 5.52 Plataforma y cabina de selección.....	107
Figura 5.53 Prensa de cámara cerrada con atado de plástico modelo HTR	108
Figura 5.54 Características técnicas y composición de la prensas de cámara cerrada HTR.....	109
Figura 5.55 Envolvedora de película extensible Cross Wrap-D-2200 LW750.....	110
Figura 5.56 Instalación compuesta por una empacadora de caja cerrada y envolvedora CW.....	111
Figura 5.57 Esquema del funcionamiento de un sistema de compactación y enfardado.....	112
Figura 5.58 Diagrama de flujo de los procesos en el CP-FIRSU	113
Figura 5.59 Modelación de la infraestructura del CP-FIRSU	114
Figura 5.60 Área de estudio, región sur del estado de Hidalgo	119
Figura 5.61 Diagrama general de la EMC.....	121
Figura 5.62 Insumos de las características geográficas para la elaboración de los mapas temáticos de la EMC.....	126
Figura 5.63 Mapas temáticos empleados en la EMC.....	127
Figura 5.64 Mapa final obtenido en la EMC	128
Figura 5.65 Puntos factibles de ubicación preliminares	130
Figura 5.66 Ubicación del punto factible número 5	131
Figura 5.67 Ubicación del punto factible número 8	132
Figura 5.68 Ubicación del punto factible número 16	133
Figura 5.69 Terreno del punto factible número 5	134
Figura 5.70 Terreno del punto factible número 8	134
Figura 5.71 Terreno del punto factible número 16	135
Figura 5.72 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible número 5	139
Figura 5.73 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible número 5	139
Figura 5.74 Resultados de la encuesta realizada (P7-P10) en el punto factible número 5.....	140
Figura 5.75 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible número 8	141
Figura 5.76 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible número 8	141
Figura 5.77 Resultados de la encuesta realizada (P7-P10) en el punto factible número 8	142
Figura 5.78 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible número 16	143
Figura 5.79 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible número 16	143
Figura 5.80 Resultados de la encuesta realizada (P7-P10) en el punto factible número 16.....	144

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RSU	Residuos Sólidos Urbanos.
CEMEX	Cementos Mexicanos.
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
FIRSU	Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos.
RME	Residuos de Manejo Especial.
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
CP-FIRSU	Centro de Procesamiento de la Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos.
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
LRSDF	Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.
SEDEMA	Secretaría de Medio Ambiente.
UE	Unión Europea.
CDR	Combustibles Derivados de los Residuos.
OFICEMEN	Agrupación de Fabricantes de Cemento de España.
CEMA	Fundación laboral del Cemento y del Medio Ambiente.
DBGIR	Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos.
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos.
PEPGIR	Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
ND	No Disponible.
MORSU	Módulo 6 de Residuos Sólidos Urbanos.
PMPGIR	Programas Estatales y Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
NMX	Normas Mexicanas.
GIREVOL	Gestión Integral de Residuos Sólidos.
CANACEM	Cámara Nacional del Cemento.
CONAPO	Consejo Nacional de Población.
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social.
SEMARNATH	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de Hidalgo.
NADF	Norma Ambiental del DF.
NTEA	Norma Técnica Estatal Ambiental.
EMC	Evaluación Multicriterio.
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
NFU	Neumáticos Fuera de Uso.
ONU	Organización de la Naciones Unidas.
ACV	Análisis de Ciclo de Vida.
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
INECC	Instituto Nacional de Cambio Climático.
RAN	Registro Agrario Nacional.
SDF	Sitios de Disposición Final.
ET	Estación de Transferencia.
PCB	Poder Calorífico Bruto.
PAJ	Proceso de Análisis Jerárquico.
Pcg	Ponderación de criterios generales.
Pce	Ponderación de criterios específicos.
ICR	International Cement Review.
ISWA	International Solid Waste Association.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el problema de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha convertido en un tema importante en muchos países, particularmente en México. Los RSU han sufrido cambios durante varias décadas tanto en volumen y composición, derivados principalmente del crecimiento de la población, los cambios en los hábitos de consumo y por una gestión ineficiente por parte de las autoridades ambientales locales, y por la misma sociedad, lo que ha originado impactos negativos en diversos elementos del ambiente, tales como las aguas subterráneas y superficiales, el aire y el suelo.

En México, alrededor de 102,000 toneladas de RSU son producidos diariamente, el 2% de éstos son generados en el estado de Hidalgo (equivalente a 1,870 t/día), principalmente en viviendas, parques, jardines y edificios públicos (INECC, 2012).

Un residuo sólido según lo define la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 2014) es: *“cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó”*.

El crecimiento económico y el nivel de consumo tienen una gran influencia en la producción de residuos sólidos en la sociedad y consecuentemente demandan cada vez más una gestión eficiente de los servicios de limpieza urbana, principalmente en lo que concierne al tratamiento y la disposición final de los residuos (Penido, 2006).

La gestión integral de residuos sólidos considera todo el ciclo de generación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final. La puesta en práctica de este concepto va desde la minimización de la generación de residuos en el proceso productivo, hasta la maximización de su aprovechamiento, a través de la implementación de sistemas de recolección más adecuados a cada situación, tecnologías y procesos de tratamiento, recuperación y reciclaje. De este modo se desea que solo queden para disposición final los residuos que ya no se les pueda dar ningún aprovechamiento.

Los principales receptores de los impactos negativos por una inadecuada gestión de los residuos resultan ser los ecosistemas aledaños a los sitios de manejo y disposición final.

Los residuos se pueden definir como la materia prima dispuesta en el lugar equivocado. Debido a esto, no solamente se deben ver como un problema ambiental o social sino como un recurso que debe ser aprovechado. El desafío del futuro consiste en maximizar el uso y reutilización de los recursos procedentes de los residuos, lo que implica también realizar un consumo consciente y aumentar la calidad de la gestión integral de los residuos desde su generación hasta su aprovechamiento.

El principal obstáculo, para la gestión adecuada de los RSU, tiene que ver con el requerimiento de infraestructura de manejo de residuos, que de acuerdo a sus características físicas y químicas puedan ser susceptibles de ser aprovechados. Allí surge la necesidad de construir infraestructura para los diferentes sistemas integrales de gestión que cumplan con ciertos requerimientos técnicos y que consideren alternativas de tratamiento que sean económicamente posibles, ambientalmente eficientes y socialmente aceptables.

1.1 Justificación

La infraestructura para realizar la gestión de los RSU en el estado de Hidalgo opera de manera ineficiente, la mayoría de los residuos son dispuestos en rellenos sanitarios que no operan conforme a la normativa o en basureros a cielo abierto. La recuperación de materiales con potencial valorizable se realiza de manera tradicional por personas de bajos recursos en condiciones antihigiénicas. Por otra parte, frecuentemente se realiza la quema de residuos a cielo abierto debido a la falta de servicios de saneamiento municipal. Esta situación coloca a Hidalgo en una posición desfavorable en la gestión y el aprovechamiento de los RSU en comparación con los otros estados de la República Mexicana (Sánchez, 2007).

Paralelamente a la generación y aprovechamiento de residuos, el concreto es el segundo material más consumido en el mundo de la industria de la construcción después del agua, siendo su principal componente el cemento. El proceso de fabricación de cemento demanda un uso intensivo de combustibles. Desde el año 2011 la empresa cementera Cementos Mexicanos (CEMEX) se dio a la tarea de buscar y crear en México una nueva fuente alterna de combustible, con la finalidad de ahorrar energía y reducir las emisiones de gases a la atmósfera. Esa fuente alterna de combustible la encontró en la Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FIRSU) que generan las áreas urbanas y rurales del país. Para generar dicha energía se necesita separar y procesar los residuos o cualquier material combustible derivado de los RSU (especialmente los que tengan un alto poder calorífico) para generar las “pacas FIRSU”, mediante un Centro de Procesamiento de la Fracción Inorgánica de Residuos Sólidos Urbanos (CP-FIRSU) para posteriormente realizar su valorización energética a través de un tratamiento térmico, en particular el coprocesamiento, el cual es de interés principal para las cementeras.

La misma empresa, consciente de la necesidad de tratar adecuadamente los residuos, contactó al Instituto de Ingeniería, UNAM, para solicitarle que se realizara un estudio para determinar la ubicación del sitio factible para instalar un CP-FIRSU en el estado de Hidalgo, determinando las capacidades de la infraestructura y la inversión requerida.

El estado de Hidalgo fue seleccionado como área de estudio para analizar la ubicación factible de un CP-FIRSU por las siguientes razones:

- a) En la entidad la mayoría de los residuos generados no son valorizados. El gobierno del estado inauguró hace poco tiempo los rellenos sanitarios de Tula, Tepehua y Apan (CESOP, 2012), eso origina que dichos residuos se conviertan en un problema ambiental, en vez de una oportunidad para aprovecharlos como materia prima mediante su tratamiento, ya sea por medio del reciclaje o el coprocesamiento. Otra razón es la cercanía con la zona urbana del valle de México y el cierre del relleno sanitario Bordo Poniente lo cual puede implicar riesgos de crecimiento en el volumen de residuos si son dispuestos en Hidalgo.
- b) Hidalgo carece de infraestructura para procesar y valorizar los residuos que se generan. En la entidad solo existe una planta de selección de residuos inorgánicos a cargo del grupo “Cambio Verde”, por otro parte, tampoco cuenta con plantas de composta que puedan aprovechar los residuos orgánicos. Así mismo hace falta implementar una norma que regule correctamente el manejo y aprovechamiento de los residuos en el estado.
- c) Posee el mayor número de plantas cementeras de las entidades federativas del país, las principales empresas son: CEMEX, Cementos Fortaleza, Cruz Azul y en la frontera entre Hidalgo y el Edo. de México la cementera Apasco, las cuales son clientes potenciales para aprovechar los residuos como combustibles alternos.

La selección de sitios para la ubicación de infraestructura de aprovechamiento de residuos sólidos que cumplan con requerimientos ambientales es muy importante en la construcción de infraestructura relacionada con el manejo y tratamiento de los RSU, ya que en el cumplimiento de las disposiciones normativas evita la contaminación en el suelo, aire y mantos acuíferos (Roé *et al.*, 2014).

En este trabajo se propone analizar la ubicación viable de un CP-FIRSU en el estado de Hidalgo que cumpla con requisitos ambientales, técnicos y socioeconómicos con base en aspectos normativos, aplicados en el entorno de los sistemas de información geográfica; por otra parte, que sea eficiente en términos logísticos y económicos. Principalmente para lograr mitigar los impactos ambientales negativos por la inadecuada gestión de los RSU, disminuir los costos de su transporte, promover el reuso, reciclaje y cualquier otra valorización en la que puedan ser empleados, principalmente como una fuente de combustible alternativo a través del coprocesamiento, para evitar su disposición final y la pérdida de materia prima.

1.2 Objetivos

General

Evaluar la factibilidad ambiental, técnica y socioeconómica para la ubicación de un CP-FIRSU a partir de los RSU generados en el estado de Hidalgo para ser aprovechados como combustibles alternos por las cementeras o por cualquier otro tipo de valorización que se considere conveniente.

Particulares

1. Revisar la normativa existente relacionada con la gestión integral de los RSU en la República Mexicana y en el estado de Hidalgo.
2. Localizar los sitios de manejo integral de RSU y las plantas cementeras que operen en Hidalgo.
3. Determinar los residuos con alto poder calorífico, que serán utilizados como combustible alternativo, así como los residuos que puedan someterse a otro aprovechamiento.
4. Realizar análisis bibliográficos y visitas técnicas respecto a la infraestructura, tecnologías y equipos que se requieren para la selección y procesamiento de la FIRSU.
5. Ubicar los sitios que proporcionarán los RSU al CP-FIRSU, así como las plantas cementeras u otras industrias que serán los clientes potenciales para el consumo de la FIRSU.
6. Elaborar una proyección de los RSU a 10, 20 y 30 años, que asegure la capacidad de recepción de los residuos que lleguen al CP-FIRSU, determinando las capacidades de su infraestructura y la inversión requerida.
7. Analizar las alternativas de ubicación y logística a través de los sistemas de información geográfica, para determinar el sitio factible para la propuesta de instalación del CP-FIRSU.

1.3 Alcances

En esta investigación se propone realizar el pretratamiento de los RSU a través de la ubicación factible de un CP-FIRSU en el estado de Hidalgo, sin considerar o aceptar los residuos infecciosos ni peligrosos.

El trabajo se enfoca principalmente en el aprovechamiento de los residuos con potencial energético denominados “FIRSU”, así como de los residuos con potencial de reúso y reciclaje.

Otro aspecto que se desarrolla en el presente trabajo es una Evaluación Multicriterio y un análisis fuente-destino para evaluar de manera preliminar la ubicación factible del CP-FIRSU en el estado de Hidalgo.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se muestra el desarrollo de la valorización energética de los residuos sólidos como combustibles alternos, en diferentes áreas productivas, principalmente en la industria cementera, tanto a nivel nacional como internacional y la situación de la valorización de residuos en la Unión Europea (UE). También se presenta un panorama general sobre ciertos residuos con alto poder calorífico que pueden ser empleados como combustibles alternos a través del coprocesamiento en los hornos cementeros.

2.1 Combustibles derivados de los residuos (CDR)

Combustibles derivados de los residuos (CDR) es un término que se aplica a los materiales con un alto poder calorífico (es decir, materiales capaces de liberar un alto porcentaje de energía cuando se queman) que se extraen de flujos de residuos y se utilizan como combustible.

La utilización de residuos como combustible en los países occidentales se remonta a los años 30. En ese entonces, los residuos se promovían como combustible alternativo, aunque el mercado no los aceptó por completo a causa de la existencia de combustibles fósiles que eran más baratos (Puig *et al.*, 2012).

En los últimos diez años ha crecido el interés por los CDR entre la industria cementera y la industria energética, principalmente por cuestiones económicas, entre las cuales cabe destacar el aumento del precio de los combustibles fósiles. En la UE también juegan un papel muy importante las políticas comunitarias, que instan a una reducción de los residuos destinados a vertedero, a un aumento de la participación de las fuentes renovables de energía y a la reducción de las emisiones de CO₂. En algunos países europeos también ha jugado un papel importante el elevado costo de los tratamientos finales en el manejo de los residuos a través de la incineración y los vertederos (Puig *et al.*, 2012).

A diferencia de lo que ocurrió en los años 30, actualmente los productores de combustibles derivados de los residuos han apostado por un sistema de estandarización que persigue garantizar las propiedades del combustible producido a partir de los residuos con el fin de hacerlos más confiables para la industria.

La utilización de dichos productos conlleva una serie de consecuencias para la sociedad y el ambiente, que conviene analizar, pues a veces solo representa beneficios económicos para algunos gestores de residuos y algunas instalaciones industriales.

Algunos de los principales tipos de residuos a partir de los que se producen CDR son:

- ❖ La fracción de rechazo de los RSU.
- ❖ Los residuos industriales no peligrosos.
- ❖ Los residuos voluminosos.
- ❖ El rechazo de plantas para el reciclaje de residuos recogidos selectivamente (por ejemplo plantas de selección de envases plásticos) (Puig *et al.*, 2012).

2.1.1 Valorización energética de los residuos sólidos como combustible alternativo en el ámbito internacional

En los países de la UE se ha producido un incremento paulatino en la generación de residuos en paralelo a su crecimiento económico, especialmente en Holanda, Suiza, Francia, Austria, Bélgica y Alemania, donde los sistemas de gestión de los residuos llevan décadas orientadas a prevenir la disposición final en vertederos controlados (rellenos sanitarios) o en vertederos clandestinos (basureros) y aprovechar la capacidad calorífica de los residuos en los hornos cementeros (CEMA, 2012).

En la Figura 2.1 se presentan algunos datos de la oficina estadística de la comisión Europea, mejor conocida como Eurostat, de las cantidades de residuos que generan por año los habitantes de países de la UE.

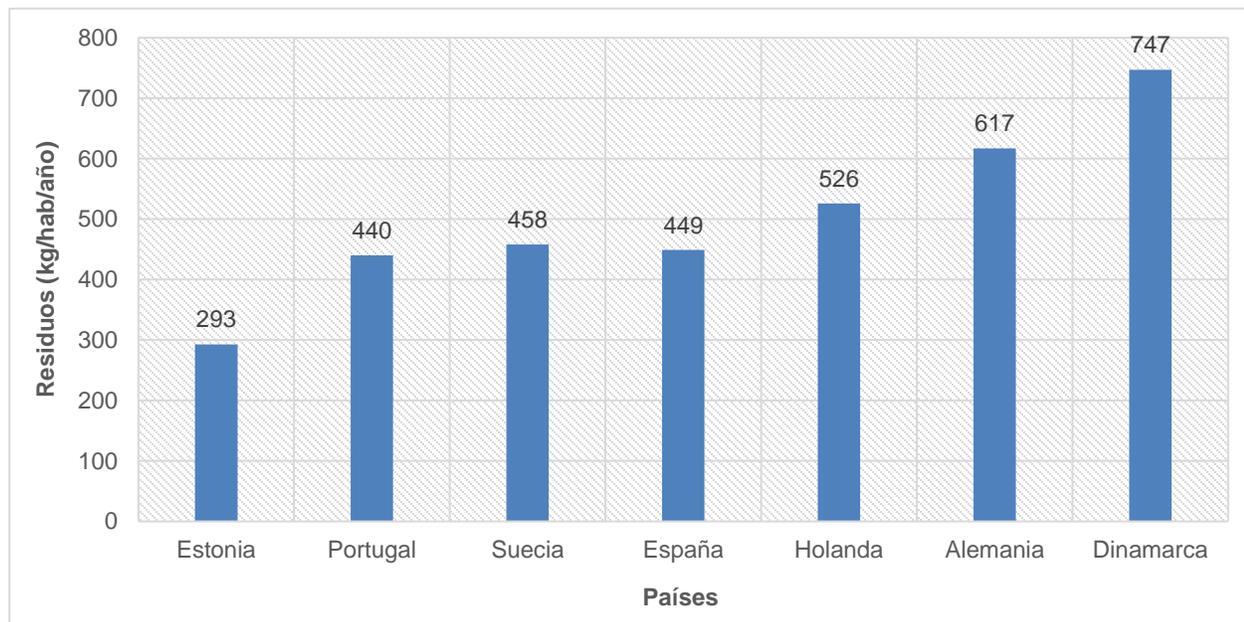


Figura 2.1 RSU generados por habitantes de países de la UE en el año 2012

Fuente: (Elaboración propia a partir de Eurostat, 2015)

Ante esta situación insostenible, desde un punto de vista ambiental, la UE, lleva años orientando sus políticas de gestión de residuos hacia el fomento de la prevención en la generación de los mismos, para disminuir su crecimiento.

Los países comprometidos a promover el cuidado del ambiente han apostado por la eliminación de los vertederos. En la Figura 2.2 se puede observar como algunos países ya lo han conseguido (Holanda, Dinamarca, Suecia y Bélgica entre 3 y 8% de sus RSU son depositados en vertederos controlados).

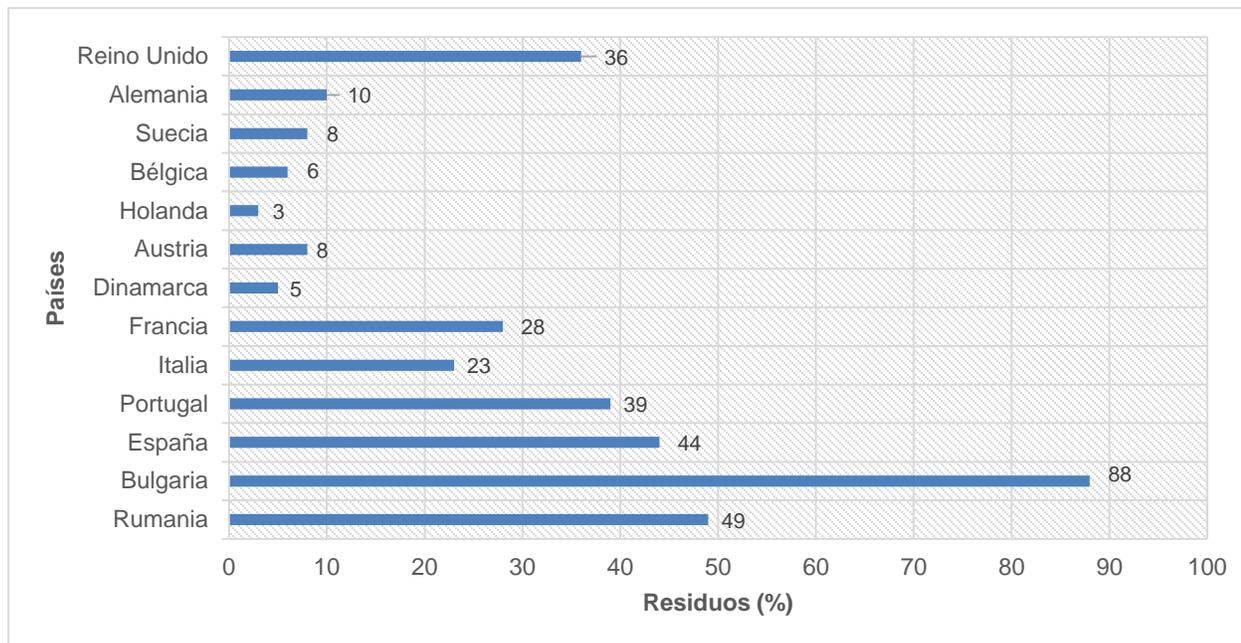


Figura 2.2 Porcentaje de residuos destinados a vertederos en el año 2012 en países de la UE
Fuente: (Elaboración propia a partir de Eurostat, 2014)

Los RSU sometidos a una correcta gestión pueden convertirse en materia prima recuperable para la sociedad, pero normalmente son recursos que no son valorados y que se destinan a vertederos, como en el caso de Bulgaria y Rumania.

En este contexto se puede asegurar que en Bulgaria y Rumania se está depositando materia prima en los vertederos, porque estos residuos tienen un potencial energético que bajo ciertas condiciones y aplicando un correcto control del proceso de valorización energética se pueden utilizar como combustible en los hornos de las plantas cementeras, aprovechando principalmente los residuos que ya no se pueden reutilizar ni reciclar.

En la Figura 2.3 se muestra el porcentaje de los diferentes tipos de tratamiento o disposición final a los que se someten los residuos en distintos países de la UE. Los países del norte de Europa con los mayores niveles de concientización ambiental en sus sociedades, son los países donde menos se depositan los residuos en vertederos y en basureros, a diferencia de esto se reciclan y se aprovecha el valor energético de los residuos (ya sea mediante incineración con recuperación energética o mediante su uso como combustible alternativo en hornos de cemento). Los países del sur y el Este de la UE utilizan mayoritariamente los vertederos controlados para disponer sus residuos. En Alemania se promueve realizar el reciclaje en vez de la incineración como una opción más sostenible.

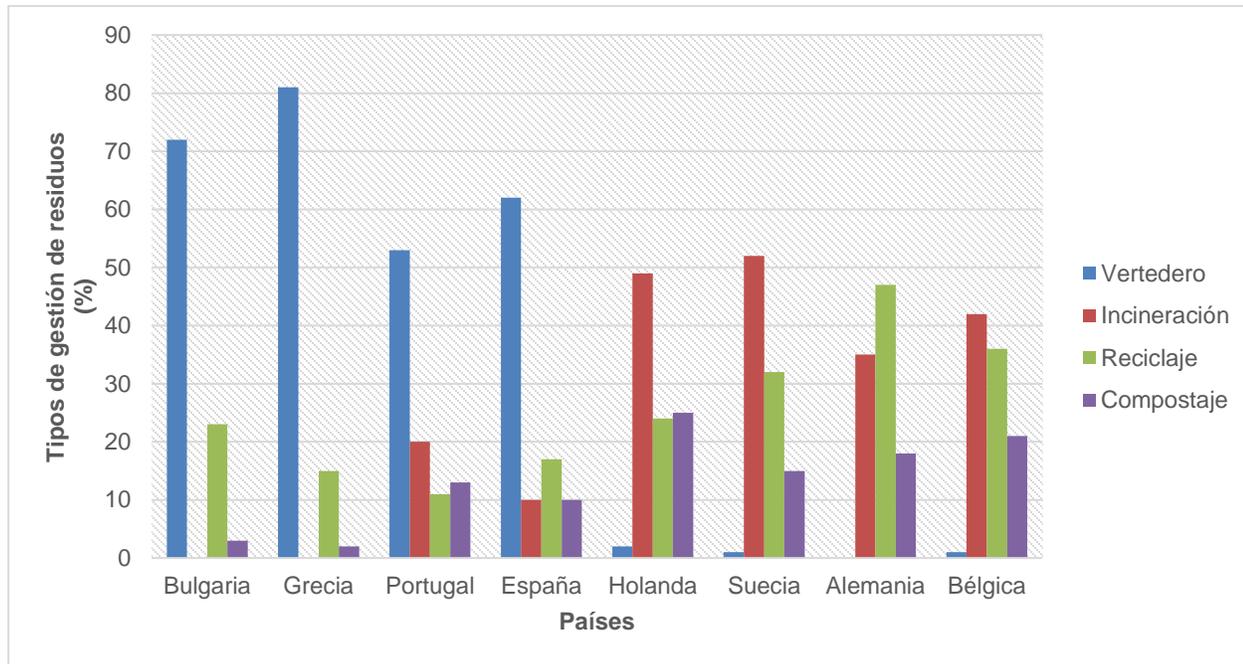


Figura 2.3 Formas de gestión de los residuos en países de la UE en el año 2012
Fuente: (Elaboración propia a partir de Eurostat, 2015)

Situación en España

En España, la empresa cementera CEMEX es líder en la tasa de sustitución de combustibles alternativos, también denominados “*enerfuel*”. CEMEX España tiene seis fábricas de cemento, con una capacidad instalada de casi 11 millones de toneladas anuales de cemento. En dicho país el destino principal de los CDR son actualmente las cementeras, que lo utilizan como sustituto, principalmente, del coque de petróleo. En el año 2008, un 83.60% del aporte calorífico de las cementeras españolas procedía del coque de petróleo, un 9.50% de otros combustibles tradicionales y el resto (6.90%) de combustibles alternativos (Puig *et al.*, 2012).

El consumo de CDR en las cementeras españolas creció de forma importante durante los últimos años, pasando de ser casi nulo en 2007 a 111,794 toneladas en 2010. El consumo de CDR representó el 4.29 % del total del consumo de combustibles en peso en el año 2010 (CEMA, 2012).

Según la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (CEMA) de la que forman parte la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), 30 de las 36 fábricas de cemento españolas están autorizados para utilizar residuos como combustible.

El impacto favorable en la sociedad por la implementación de combustibles alternativos en la industria cementera adquiere mayor relevancia debido a que de acuerdo con las proyecciones, el consumo de cemento a nivel mundial podría alcanzar 3.4 billones de toneladas para el año 2020, con el correspondiente incremento en el uso de energía, materias primas y generación de contaminantes (EUROSTAT, 2014).

En noviembre de 2001 OFICEMEN y el entonces Ministerio de Medio Ambiente firmaron el "acuerdo voluntario para la prevención y el control de la contaminación de la industria española del cemento". En dicho convenio se incluye una relación de actuaciones de prevención, reducción y control de la contaminación, entre las que se encuentra la "valorización de residuos en la fabricación de cemento para su utilización como combustibles alternativos".

Algunas plantas de producción de CDR son propiedad o están promovidas por las mismas empresas cementeras. Por ejemplo, en mayo de 2009 la cementera CEMEX en España puso en servicio una planta de selección y trituración de residuos plásticos para su valorización energética en su fábrica de Castillejo (Toledo). La planta tiene una capacidad de 35,000 t/año (CEMEX, 2011).

En España el uso futuro de los CDR dependerá en gran parte de la voluntad de las administraciones, que son las que deben autorizar su consumo en la industria a través de las autorizaciones ambientales. En el caso de que ocurra dicha autorización, las empresas productoras de CDR verán una oportunidad de negocio y previsiblemente impulsarán nuevos proyectos de producción y consumo para el CDR. Su uso también puede verse afectado por las políticas de fomento de combustibles nacionales, como el carbón, que detendría su demanda.

En el caso de que la administración no autorice el uso de CDR en la industria puede ocurrir que los productores de CDR enfoquen su negocio a la exportación, como está ocurriendo en Grecia, donde las cementeras no disponen de las autorizaciones necesarias para consumir CDR.

Europa

La producción de CDR a partir de residuos municipales está bastante desarrollada en Europa. Los países en los que su producción está más consolidada son Alemania, Austria, Italia, Países Bajos y Suecia. En Bélgica y en el Reino Unido el mercado está en proceso de consolidación (CEMA, 2012).

Actualmente, el principal uso que se da en Europa a los CDR es la sustitución de combustibles fósiles en la industria del cemento y de la cal, aunque en algunos países, como Alemania, el consumo en centrales de producción de energía ya sobrepasa el consumo en cementeras. Algunos hornos de producción de acero también utilizan CDR como sustituto del carbón.

Según la asociación Europea de productores de CDR, los factores determinantes para el desarrollo de los CDR no han sido los mismos en todos los países. Así, a pesar de que todos ellos han tenido que confrontar la subida de precio de los combustibles (incluido el coque de petróleo), y una variable disponibilidad de otros combustibles alternativos (como neumáticos, harinas cárnicas o residuos peligrosos), los factores específicos que han propiciado el uso de CDR en cada país han sido los siguientes:

- ❖ Alemania: prohibición de los basureros de residuos y estrategia de gestión de los recursos.
- ❖ Reino Unido: acciones políticas que prohíben la incineración convencional de los residuos.
- ❖ Italia: legislación que otorga a los CDR la condición de producto.

- ❖ Bélgica: la demanda por parte de las cementeras para ser ocupados en sus hornos.
- ❖ España: la demanda por parte de las cementeras para ser ocupados en sus hornos e implementación de normativa que no permite el otorgamiento de permisos para la incineración convencional de los residuos.

En Alemania, la elevada producción de CDR ha producido una competencia creciente entre los distintos tipos de instalaciones de valorización energética (incineradoras, coprocesadoras, etc.). Alemania es el país europeo con una mayor producción de CDR, de las 12 millones de toneladas producidas en Europa en el año 2008, un 47% fueron producidas en Alemania (Puig *et al.*, 2012).

Actualmente el mercado de CDR es sobre todo local. Los productores de CDR esperan que su creciente uso y la internacionalización de su consumo establezcan los precios a niveles atractivos para los potenciales consumidores.

La demanda de CDR en Europa no ha parado de crecer en los últimos años, y la demanda por parte de la industria de cemento, del acero y de la generación de energía está en aumento.

La evolución de su consumo dependerá, en gran parte, de la evolución del precio de los combustibles fósiles y de la evolución del mercado de emisiones de CO₂, que determinarán el precio de emisión, así como las políticas de residuos.

En la Figura 2.4 se muestra el porcentaje de los países europeos con mayor producción de CDR.

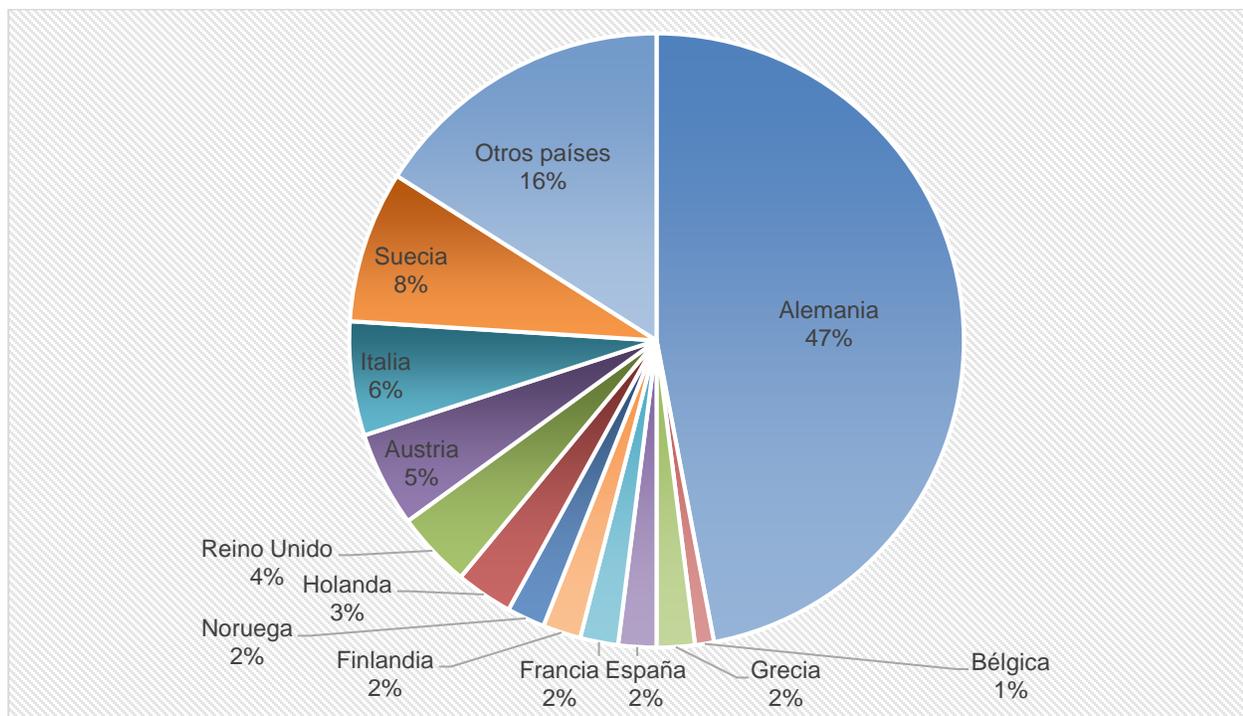


Figura 2.4 Producción de CDR en países de la UE en el año 2008

Fuente: (Elaboración propia a partir de Puig *et al.*, 2012)

2.1.2 Valorización energética de los residuos sólidos como combustibles alternativos en el ámbito nacional

Los combustibles alternativos son una pieza fundamental de la estrategia de energía y reducción de emisiones en las cementeras que operan en México principalmente en CEMEX y HOLCIM, las cuales buscan reducir su impacto ambiental y maximizar la contribución de sus plantas al ambiente y la sociedad. Los combustibles alternativos generan muchos beneficios al ambiente, entre ellos: disminuir el uso de combustibles fósiles convencionales no renovables, proporcionar una solución ordenada, final y ecológicamente responsable para disponer los residuos, evitando la saturación de los rellenos sanitarios, reduciendo las emisiones de CO₂ a la atmósfera y principalmente su aprovechamiento energético.

El uso de combustibles alternativos en las plantas cementeras puede involucrar un diálogo con grupos sociales antes de la implementación de algunos proyectos que se pretendan desarrollar cerca de comunidades, mientras que la inversión para promover tecnologías para el campo de los combustibles alternos para mejorar el control de los procesos de producción que sean amigables con el ambiente son también necesarias. Otras consideraciones clave son la disponibilidad de combustible alterno así como una adecuada estrategia de transporte de éstos hacia la planta cementera, con costos que les permitan ser competitivos al comparárseles con combustibles de mayor densidad energética.

En México, la eliminación de los residuos domésticos es un problema que todos los días se incrementa debido a una creciente población, aunado a una mayor generación de residuos *per cápita*. Que las plantas de cemento estén situadas en las proximidades de las fuentes de combustibles alternativos, puede ofrecer oportunidades importantes para disminuir la acumulación de los residuos domésticos, sin embargo, existen desafíos para esas plantas que están situadas más lejos; además, antes de ser considerado conveniente para usarlos en las plantas cementeras, estos residuos necesitan ser separados en fracciones que aumente su potencial de aprovechamiento, por medios manuales o a través de medios mecánicos.

CEMEX es la primera empresa mexicana que ha desarrollado una estrategia para el coprocesamiento, en las plantas de Atotonilco, Hidalgo; Ensenada, Baja California; Guadalajara, Jalisco; Huichapan, Hidalgo; Mérida, Yucatán; Monterrey, Nuevo León; Tepeaca, Puebla; y Zapotiltic, Jalisco. En estas plantas se utilizan las pacas FIRSU en sus hornos cementeros como combustible alterno. Esto forma parte de sus programas de sustentabilidad y proyectos de innovación tecnológica y ambiental. En la Figura 2.5 se ilustra el proceso de la estrategia implementada por CEMEX para el aprovechamiento energético de los RSU.

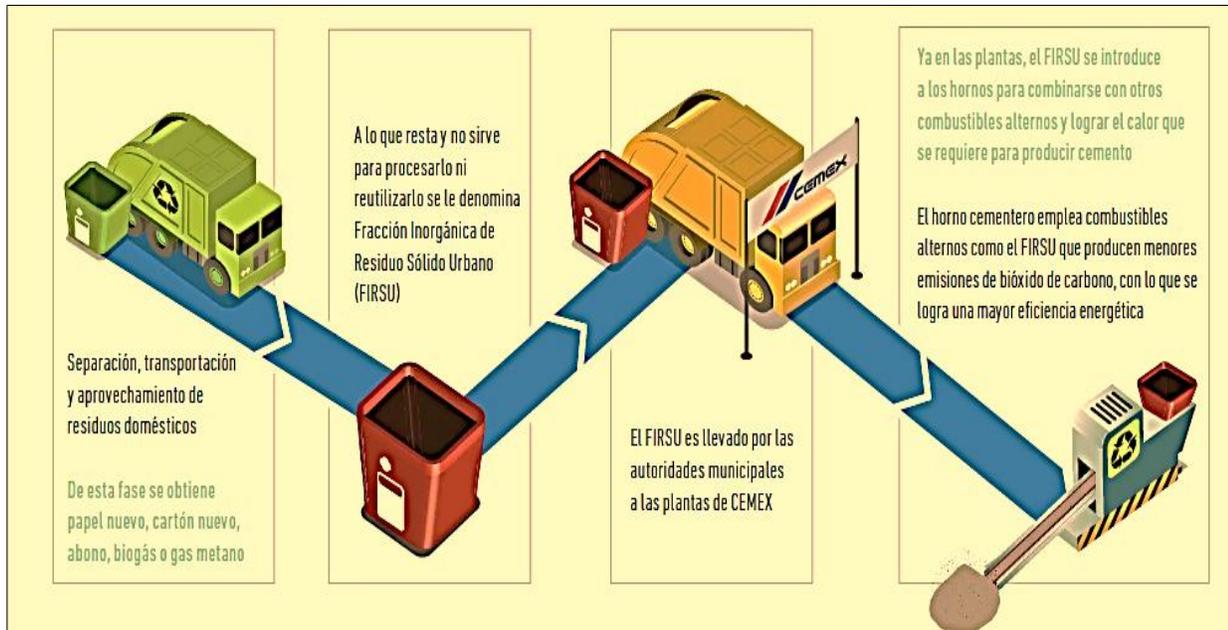


Figura 2.5. Estrategia implementada por CEMEX para el aprovechamiento de los RSU
Fuente: (CEMEX, 2012)

El proceso para obtener las “pacas FIRSU” consiste en realizar una selección mecánica y manual que conduce a la obtención de cuatro mezclas de residuos separadas:

- 1) Residuos orgánicos con una alta tasa de degradación que pueden ser aprovechados a través del compostaje (residuos de alimentos y jardinería).
- 2) Residuos no deseables para la valorización energética (residuos de la construcción, vidrio, metales, pilas, entre otros), que es preferible que se sometan a un manejo y tratamiento específico de acuerdo a sus características, ya que pueden ocasionar que disminuya la eficiencia energética de los hornos cementeros o los dañe.
- 3) Residuos valorizables que presentan un alto potencial de reciclaje (PET, aluminio, papel, cartón, etc.).
- 4) Fracción de residuos remanentes con alto poder calorífico denominada “FIRSU” (de acuerdo a la nomenclatura empleada por la empresa CEMEX), conformada por una mezcla de pedacerías de plásticos, papel, cartón y textiles, que debido a su condición física no son viables para ser reusados o reciclados; sin embargo pueden ser aprovechados como combustibles alternos en los hornos cementeros.

Es importante mencionar que los residuos que conforman la FIRSU son adecuados para su uso como combustibles alternativos si tienen un contenido energético. Este contenido de energía depende principalmente del tamaño de la fracción combustible y del contenido de humedad (Mokrzycki *et al.*, 2003).

La empresa CEMEX pretende implementar el uso de la FIRSU en diversos sectores del país para brindar esta nueva solución al evitar disponer los RSU en rellenos sanitarios ubicados cerca de las comunidades y su disposición inadecuada. Su objetivo es producir aproximadamente 1,800 t/día de pacas FIRSU en México. En cuanto al uso de combustibles alternos, la empresa tiene un registro de 25% a nivel global, mientras que en el caso de México es de 17%. En la Figura 2.6 se muestra la composición de la FIRSU después de ser procesada (CEMEX, 2012).



Figura 2.6 FIRSU sometido a procesamiento
Fuente: (CEMEX, 2012)

El potencial energético para utilizar la FIRSU como combustibles alternos en los hornos de cemento ha dado lugar al proyecto “CEMEX FIRSU” un centro innovador para el procesamiento de RSU. Como se muestra en la Figura 2.7, este sistema ofrece una forma de reducir los volúmenes de residuos enviados a los rellenos sanitarios cercanos, mientras que mejora la tasa de recuperación de materiales reciclables y proporciona una fuente de combustible alternativo.



Figura 2.7 Sistema FIRSU en un sitio de disposición final
Fuente: (ICR, 2014)

Descripción del proceso

Los sistemas de proceso se deben diseñar para ser colocados en lugares estratégicos considerando aspectos ambientales, sociales y económicos. Se pueden tener plantas móviles o fijas, las plantas móviles se instalan por un tiempo determinado en el origen de los materiales a utilizarse como combustibles alternativos, llevando a cabo el saneamiento de un sitio específico, uno tras otro. Los sistemas de proceso fijos permiten mejores prácticas de gestión y manejo de RSU para generar una mayor cantidad de combustibles alternativos que pueden ser aprovechados en diferentes áreas, como el coprocesamiento en los hornos cementeros.

Primeramente los RSU se colocan en una tolva y son procesados a través de diferentes equipos de reducción, separación y compactación. Esto permite obtener residuos con un tamaño adecuado para generar las “pacas FIRSU” y más adelante para el coprocesamiento dentro de un horno cementero. Se han utilizado diferentes tecnologías disponibles para la reducción de tamaño, cada una con sus ventajas particulares, según las necesidades que se requieran y las características del material. Las trituradoras comúnmente están acompañadas con mallas para el control de tamaño.

Separación

La etapa de separación se lleva a cabo con un separador magnético que se coloca sobre una cinta transportadora y es utilizado para separar los metales que se mantengan en la mezcla de residuos. Estos metales más tarde pueden ser reciclados o enviados para su disposición adecuada. Una etapa intermedia de separación se extrae el material fermentable con un clasificador. El material extraído puede ser usado para generar composta o biogás.

La alta eficacia en extracción es importante; la composición de los combustibles alternos debe estar libre de material no deseado. Un transportador vibratorio lleva material dentro de una tercera y final etapa de separación, donde un clasificador inteligente elimina material según su densidad y tamaño. Las baterías y las rocas que hayan llegado hasta esta etapa, están entre los tipos de materiales no deseados que se retiran. Esta parte automatizada del sistema determina si un objeto debe ser separado y mecánicamente removido de la corriente.

Empacado y envoltura

Los costos de transporte aumentan drásticamente cuando la densidad disminuye. Esto es particularmente importante con combustibles con un bajo poder calorífico, dado que la materia prima final que será aprovechada será la energía, no la masa. Una compactadora reduce el volumen de la FIRSU, primeramente para que sea compacta y pueda ser manejada más eficientemente y después sea transportada en cantidades mayores, como se muestra en la Figura 2.8. La etapa final, antes del almacenamiento y transporte de la FIRSU, es envolverlo y flejarlo. Una envolvente automatizada cubre cada paca con una película plástica fina, para protegerlo de las plagas y daños relacionados con el clima y permite facilitar su manejo.



Figura 2.8 Compactación y atado de la FIRSU
Fuente: (ICR, 2014)

Sistema FIRSU móvil en México

El primer sistema de FIRSU móvil en México ha estado en operación desde el año 2013, con una tasa de producción de combustible alternativo típico de 100 t/día (CEMEX, 2012).

El sistema FIRSU puede trabajar con una central eléctrica diésel. Esto proporciona la libertad para que sea colocado donde quiera que sea necesario, es decir en la fuente del combustible alternativo.

Los hornos cementeros regionales pueden ser alimentados con combustibles alternos con las características adecuadas, reduciendo los impactos asociados a la mala disposición de los residuos en el ambiente.

El material fermentable se queda en el relleno sanitario, con una concentración más alta después de la extracción de la FIRSU, aumentando así el potencial de producción de biogás por unidad de superficie, el cual es más tarde utilizado para generar energía eléctrica. En términos de sostenibilidad, los beneficios generados por el sistema de FIRSU móvil son claros. Los impactos ambientales se reducen tanto en la producción de cemento como en los rellenos sanitarios y basureros, ya que reduce el uso de combustibles fósiles y como resultado las emisiones de CO₂, también se amortigua la carga de los sitios de disposición final. Así mismo se han desarrollado las cadenas de valor y nuevos mercados, junto con otros beneficios sociales para las comunidades locales.

Así mismo, ante la necesidad que existe en el país de promover e invertir en infraestructura sustentable para la separación de residuos sólidos, bajo la filosofía de "basura cero" y acorde con su estrategia de disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂, CEMEX implementó en Huichapan, Hidalgo un innovador sistema basado en una Planta Móvil para la separación de la FIRSU (véase, Figura 2.9). Esta planta tiene como objetivo principal el saneamiento del municipio de Huichapan que da servicio a 37 comunidades y 8 barrios en la cabecera municipal, con una generación de RSU de 45 t/día, y una generación per cápita 0.92 kg/hab/día, así mismo tiene la capacidad suficiente para dar servicio a los municipios vecinos de Nopala y Tecozautla (CEMEX, 2012).

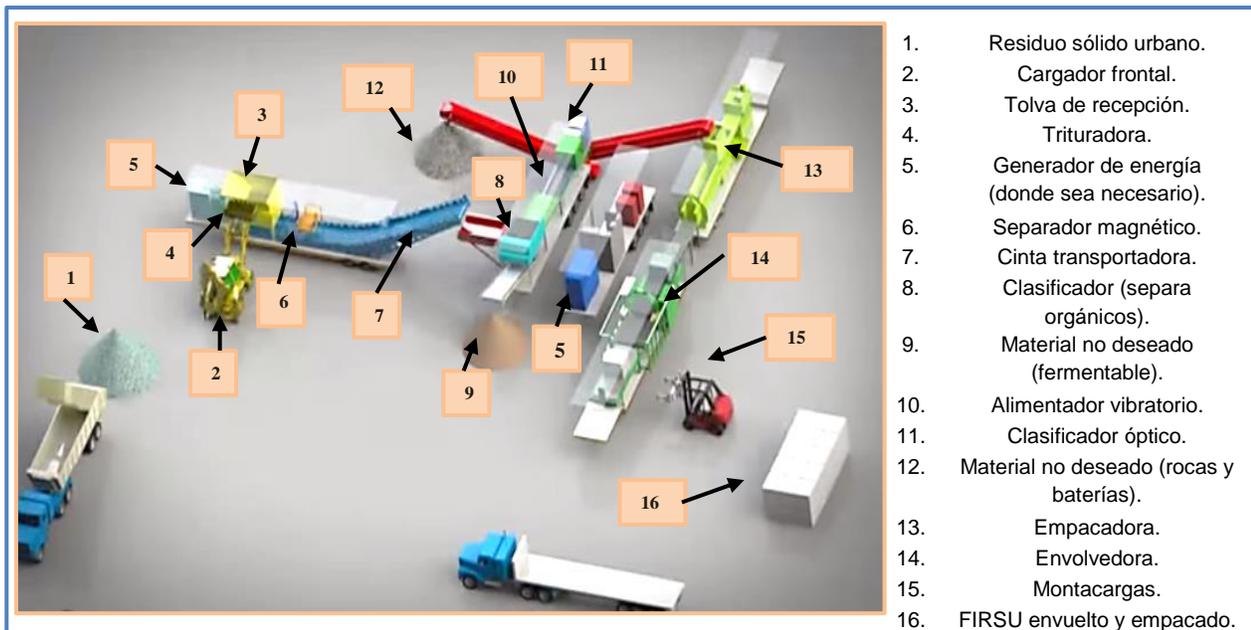


Figura 2.9 Proceso del sistema FIRSU móvil
Fuente: (Elaboración propia a partir de ICR, 2014)

2.2 Gestión y procesamiento de los RSU en México

El desarrollo económico de la sociedad, el crecimiento poblacional y la globalización de los mercados, ha implicado una creciente generación y diversificación de residuos, lo que requiere de una nueva visión para realizar la gestión integral de los mismos, que promueva su aprovechamiento y la prevención de su generación.

Aunado a lo anterior, el estilo de vida actual ha impactado en los patrones de consumo de la población, afectando al ambiente entre otras cosas debido al aumento en la cantidad de RSU, de manejo especial y peligrosos de carácter doméstico que se generan y llegan a los sitios de disposición final, incrementando además los costos de su manejo, algo que directa o indirectamente se refleja en el bolsillo del consumidor y las entidades operadoras de la gestión integral de los residuos.

Tanto en los RSU y Residuos de Manejo Especial (RME) se debe aplicar el principio de “basura cero”, el cual consiste en disminuir, aprovechar y valorizar al máximo la cantidad de residuos que actualmente llegan a sitios de disposición final, a través de la reutilización, reciclaje y aprovechamiento energético; en su mayoría éstos están constituidos por materiales que pueden ser seleccionados con facilidad para usarse como materias primas recuperables tales como: orgánicos biodegradables, papel, cartón, vidrio, plásticos, metales, textiles, entre otros. Para el procesamiento de dichos materiales es necesario un paso previo; la separación de los mismos, la cual debe hacerse en condiciones específicas que permitan una adecuada selección de ellos a través de una separación primaria avanzada (véase Figura 2.10) (NADF-024-AMBT-2013).



Figura 2.10 Separación primaria avanzada de residuos propuesta en la NADF-024-AMBT-2013

Fuente: (Elaboración propia a partir de Müller, 2015)

2.2.1 Componentes de la gestión integral de residuos sólidos

La gestión de los RSU puede tener muchas variantes pero siempre debe adaptarse a las condiciones de la situación local y las posibilidades de cada región. La puesta en práctica de este concepto va desde la minimización en la generación de residuos en el proceso productivo y consumo, incluyéndose los embalajes, hasta la maximización de su aprovechamiento, a través de la implementación de sistemas de almacenamiento y recolección eficientes, adecuados para cada situación. Se deben considerar implementar estaciones de transferencia y centros de acopio, ya que mucho de los casos ayudan a optimizar las rutas de recolección y transporte de residuos. Por otro parte, las diferentes formas de tratamiento de los residuos contribuyen a proteger el ambiente y reducir el uso de materias primas, a través del reúso, reciclaje y la recuperación energética de los residuos en diferentes sectores económicos de la población. Debido a esto, los tratamientos deben ser siempre acompañados de un pre-tratamiento o acondicionamiento de los residuos, mediante la correcta instalación de un CP-FIRSU, esto con el fin de obtener la fracción de los residuos de interés. Estos pre-tratamientos pueden ir desde la separación manual de los residuos, operaciones de acondicionamiento como trituración, compactación, hasta operaciones más complejas de separación por ejemplo, por densidad, por tamaño, magnética, por corrientes de Foucault, separación óptica, etc. El objetivo de este acondicionamiento de materiales es el de ingresar el mayor porcentaje de residuos que cumplan con los requerimientos del tratamiento. En la Figura 2.11 se muestra el funcionamiento del sistema integral de RSU en la sociedad.

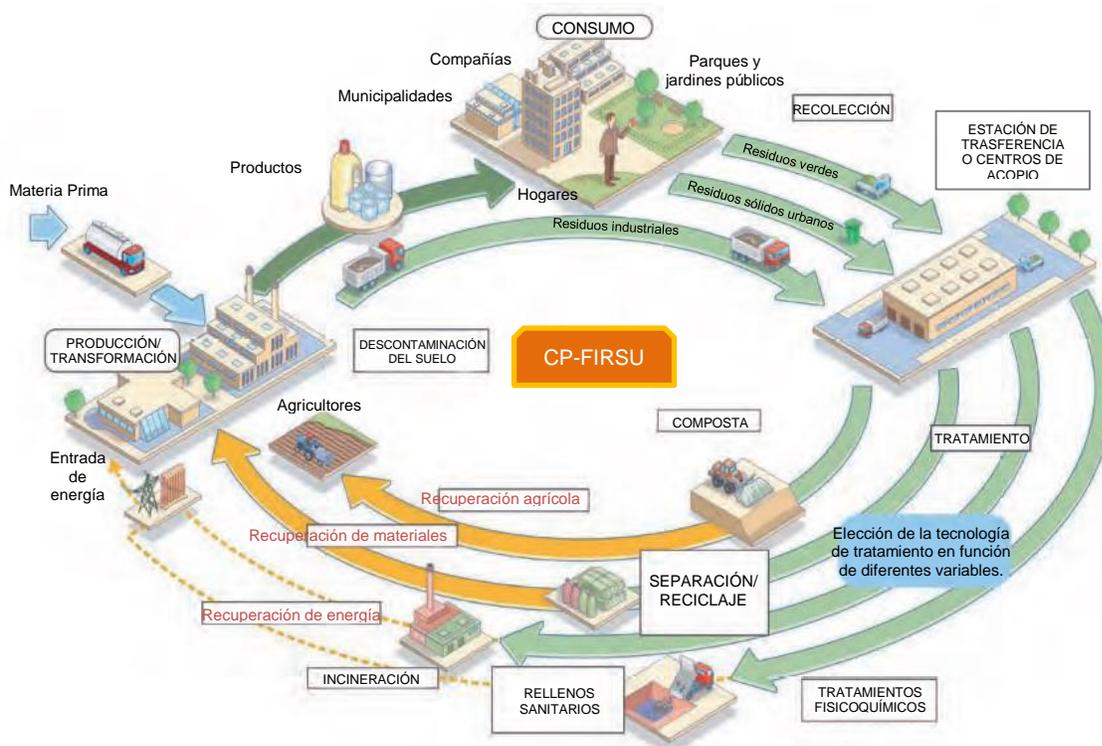


Figura 2.11 Manejo Integral de los RSU
Fuente: (Adaptado de ISWA, 2009)

A continuación se explican a detalle cada una de las etapas que conforman la gestión integral de los residuos.

Generación

En esta etapa se deben analizar la cantidad y la composición general de los residuos para el diseño de los sistemas de manejo y tratamiento. También se deben contemplar los factores que afectan estos parámetros como la localización geográfica, época del año, frecuencia de recolección, características de la población y legislación (Arellano *et al.*, 2011).

En la Figura 2.12 se muestra que la generación a nivel nacional de residuos sólidos en México es de 102,895 t/día, lo que ubica al país dentro de los diez primeros generadores mundiales de residuos sólidos. Actualmente se estima que se recolecta únicamente el 83.93% del total de los residuos generados, mismos que representan 86,357 toneladas. Del total generado, 23.53 % se destinan a centros de acopio o plantas de selección; solo poco más del 60.54% se deposita en rellenos sanitarios y sitios controlados, esto es 62,288 t/día; y el 15.93 % que son 16,395 t/día, se disponen diariamente a cielo abierto en rellenos sanitarios no controlados o en basureros clandestinos (DBGIR, 2012).

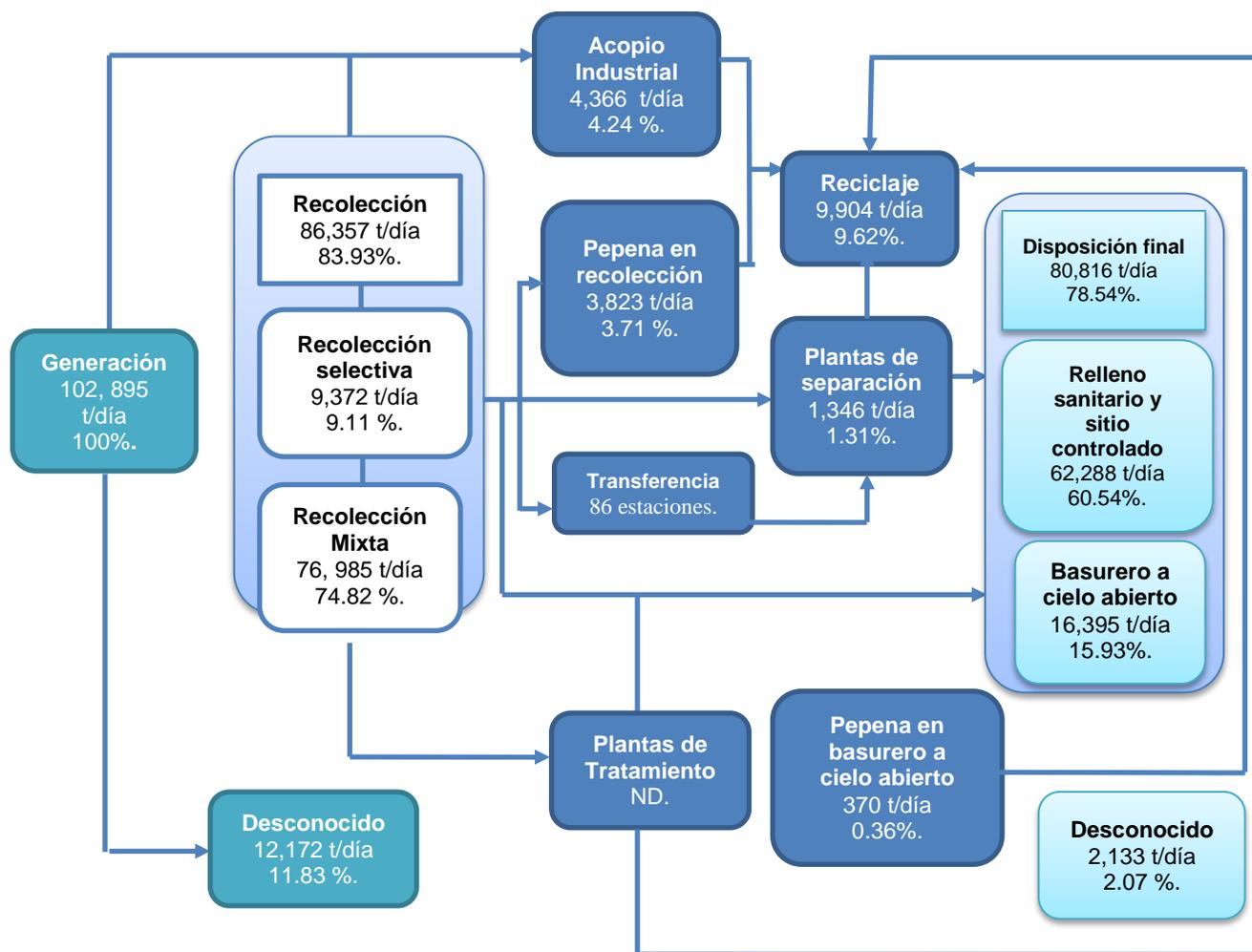


Figura 2.12 Diagrama de flujo de la generación de los RSU en México
Fuente: (Elaboración propia a partir de DBGIR, 2012)

Barrido

El barrido es otra fase del sistema de recolección de residuos y surge por la necesidad de limpieza y estética de las vías de intensa circulación peatonal además de las calles principales, parques y jardines, las que por factores naturales o antropogénicos son invadidas por residuos vegetales, arenas, lodos, envolturas de artículos, o residuos de comidas, botellas de vidrio, etc. Por lo general se prevé después de eventos especiales como ferias, festividades, asambleas, desfiles, reuniones públicas, etc.

El barrido puede efectuarse a través de dos modalidades: manual y mecánica. En el primer caso se emplea la mano de obra de barrenderos, utilizando herramientas sencillas (escobas, recogedores, botes, etc.) y se coordina con las rutas de recolección, de manera tal que los residuos permanezcan el menor tiempo posible en las calles, y la prestación del servicio puede ser individual o por brigada. Mientras que para el barrido mecánico se emplea maquinaria (barredoras de diferentes tipos), pudiéndose combinar ambos métodos (GUÍA PMPGIRSU, 2006).

Almacenamiento

El almacenamiento consiste en depositar temporalmente todos aquellos productos que carezcan de interés para el generador de residuos sólidos, éstos incluyen materiales biodegradables, como restos de alimentos y residuos forestales, además de otros materiales como cartón, vidrio, tela, plástico, metal, fibras, cuero, hule, madera, etc. Debe considerarse que el aumentar el tiempo de almacenamiento se incrementa el volumen de residuos y por tanto las necesidades de espacio para este fin.

En esta etapa se deben hacer consideraciones que involucran el tipo de contenedores a utilizar dependiendo del tipo de residuo, la localización de los mismos, salud pública, aspectos estéticos y los métodos de recolección.

Según las características de la fuente generadora hay varios tipos de almacenamiento por ejemplo, almacenamiento en casas habitación, almacenamiento comercial (mercados, tiendas de abarrotes, restaurantes y hoteles), almacenamiento industrial y almacenamiento hospitalario (Arellano *et al.*, 2011).

Recolección

La etapa de recolección es la etapa medular del sistema de aseo urbano y tiene como objetivo principal preservar la salud pública mediante la recolección de los desechos en los centros de generación y su transporte al sitio de transferencia, tratamiento o disposición final en forma eficiente y al menor costo, en esta etapa suele emplearse una proporción importante de recursos económicos destinados a la gestión de RSU (Colmer *et al.*, 2013).

Dependiendo de las medidas generales de manejo se puede hacer una recolección de residuos mezclados o separados conforme el tipo de tratamiento posterior:

- ❖ **Recolección mezclada:** La recolección mezclada es la más común, ya que solamente en algunos municipios se realiza una separación sistemática. Este sistema requiere pocos cambios en los hábitos de los generadores, ya que no precisan separarlos en la fuente. Por otro lado, este tipo de recolección anima a los trabajadores en los camiones hacer una pre-pepena para tener un ingreso adicional por la venta de material reciclable. Con eso, el proceso de la separación en el camión reduce significativamente la velocidad y la eficiencia de este servicio.
- ❖ **Recolección selectiva:** La recolección selectiva de residuos sólidos implica que las fracciones sean separadas en la fuente y posteriormente recolectadas también en forma separada. Esta separación reduce bastante la mezcla y contaminación de materiales, lo que en consecuencia aumenta su calidad y valor, permitiendo ampliar el mercado para la venta de los materiales reciclables y de la composta. La separación de residuos orgánicos tiene sentido si hay posterior compostaje y si el producto tiene mercado. Puede ser recomendable separar el grupo reciclable en más fracciones, si esto aumenta los ingresos.

La separación de materiales reciclables en el camión por el personal de recolección reduce fuertemente la eficiencia del servicio (GUIA PMPGIRSU, 2006).

Transferencia

Es la acción de transferir los residuos sólidos de las unidades vehiculares de recolección, a las unidades vehiculares de transferencia, con el propósito de transportar una mayor cantidad de los mismos a un menor costo, con lo cual se logra incrementar la eficiencia global del sistema de recolección. Con la operación del sistema de transferencia se incrementa la eficiencia del sistema de recolección, disminuyendo costos y se evita la contaminación atmosférica al disminuir el número de vehículos que asisten al sitio de disposición final.

Las instalaciones de transferencias se instalan cuando la distancia entre los núcleos de población y las plantas de tratamiento o los sitios de disposición final son muy elevadas, debido al gran número que se tendría que desplazar de una lugar a otro (Colmer *et al.*, 2013).

Separación y reciclaje

La separación de residuos puede realizarse en plantas de selección de materiales o dentro de las mismas estaciones de transferencia, dentro de estas plantas un porcentaje de los RSU que llega a ellas es separado para reincorporarse a la actividad productiva o reúso de materiales, la otra fracción de residuos se va como rechazo a los sitios de disposición final.

El reciclaje se puede definir como un proceso que tiene por objeto la recuperación, de forma directa o indirecta, de los componentes que forman parte de los residuos. Este sistema de tratamiento debe tender a lograr los siguientes objetivos:

- ❖ Conservación o ahorro de energía.
- ❖ Conservación o ahorro de recursos naturales.
- ❖ Disminución del volumen de residuos que hay eliminar.
- ❖ Protección del ambiente.

El reciclaje requiere de la separación de materiales y la eliminación de desperdicios de baja calidad. Los sistemas exitosos de reciclaje utilizan una mezcla de separación en la fuente por el generador de residuos, por la maquinaria y por gente capacitada en una locación central.

Los sistemas exitosos de reciclaje requieren una consideración cuidadosa de costos involucrados y de los mercados para los productos reciclados. Diversos tipos de instalaciones de recuperación o selección de residuos se pueden utilizar con alguna especialización en el procesamiento de residuos recolectados por separado.

La expansión en el reciclaje requiere del desarrollo de nuevos mercados. De otra manera, el exceso de provisión sobre la demanda llevara a la reducción en el valor de los materiales recuperados, hasta el punto que más recursos se utilizan para recuperar los materiales que los que se generan por la recuperación (Colmer *et al.*, 2013).

Tratamiento

El tratamiento de los RSU puede incluir procesos biológicos, físicos, químicos o térmicos, incluida la separación; cuyo objetivo principal es cambiar las características de los residuos para reducir su volumen o peligrosidad, facilitar su manipulación o incrementar su valorización.

El proceso de elaboración de composta, es un tratamiento biológico el cual produce un material estable que resulta de la descomposición de materia orgánica. Es un abono orgánico que posee un balanceado contenido de nutrientes, microorganismos y minerales, que se obtiene por la transformación biológica controlada de la fracción orgánica de los residuos urbanos, vegetales y animales.

La meta principal de aplicar alguno de estos tratamientos a los RSU generados en una determinada localidad es la disminución del volumen a confinar en el relleno sanitario y de esta forma incrementar su aprovechamiento (Arellano *et al.*, 2011).

Disposición final

Los rellenos sanitarios son en la actualidad la forma más utilizada para disponer los residuos en nuestro país. Cuando esto no se hace, los residuos terminan dispuestos inadecuadamente en las calles, los bosques o a la orilla de las carreteras, con los consecuentes impactos ambientales adversos que se pueden presentar. Actualmente existen millones de toneladas de residuos confinados bajo el subsuelo que, en menor o mayor grado, están emitiendo gases como el metano a la atmósfera, y lixiviados a los acuíferos subterráneos, y en algunos casos representan un riesgo potencial de incendio o explosión. El metano es uno de los contribuyentes principales al inventario mundial de gases de efecto invernadero (GEI) a los cuales se atribuye en gran medida el cambio climático observado en nuestro planeta. En México, la aportación de este gas al inventario nacional de emisiones es la segunda en importancia con un 23%; detrás del bióxido de carbono que proviene principalmente, de la quema de combustibles fósiles y que contribuye con el 75% (Medina, 2009).

Todo sitio que se destine para ser utilizado como relleno sanitario para disposición final de residuos sólidos, debe cumplir las siguientes condiciones:

- ❖ Contar con la impermeabilización adecuada que no permita la infiltración de los contaminantes generados en toda época del año.
- ❖ Ser de fácil acceso para cualquier tipo de vehículo o recolector que se utilice en cualquier día del año.
- ❖ Estar de acuerdo con la planeación y uso del suelo donde se localice.
- ❖ Permitir su utilización a largo plazo (de preferencia superior a 10 años).
- ❖ Tener condiciones naturales que protejan los recursos naturales, la vida animal y vegetal a sus alrededores.
- ❖ Ofrecer una cantidad adecuada de material de cubierta dentro de las cercanías del sitio. La arcilla para cobertura debe ser trabajable, compactable, de la graduación especificada y de la calidad apropiada.

Los Tiraderos a Cielo Abierto (TCA) o basureros son una forma inadecuada de disposición final de los RSU, que se caracteriza por las simples descargas a cielo abierto sobre el suelo sin medidas de protección al ambiente o a la salud pública.

2.2.2 Separación y procesamiento de residuos

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) llevó a cabo por primera vez el Censo Nacional de Gobierno, tanto Municipales y Delegaciones 2011, Módulo 6 de Residuos Sólidos Urbanos (MORSU), a través de un censo aplicado a directores generales de servicios públicos de la administración municipal, delegacional o responsables de la institución o área encargada del manejo de los RSU, lo que refleja la importancia estratégica que han adquirido para el país este tipo de residuos.

Debido a cambios en el patrón de consumo, la composición de los residuos sólidos en México se ha modificado; antes era mayoritariamente orgánica, pero ahora incluye una alta proporción de plásticos y productos de lenta descomposición, provocando un mayor deterioro ecológico. La participación de la iniciativa privada ha sido limitada, debido a problemas en la formalización y operación de los contratos de prestación de servicios y a la claridad en la interpretación del marco normativo, que provoca incertidumbre en estas empresas sobre el cumplimiento de los compromisos contractuales en los cambios de administración municipal (Sánchez, 2007).

Separación de materiales reciclables en la fuente de generación

La separación de materiales desde la fuente como papel, cartón, vidrio, plástico, metal, materia orgánica, etc., en el punto de generación y almacenamiento es una de las formas más eficaces de recuperación para su posterior valorización mediante el reciclaje, reutilización o cualquier otro proceso, por lo tanto el principal objetivo de un sistema con separación en fuente de residuos es separar y recuperar la mayor cantidad de materiales con el mayor grado de calidad posible, para que pueden ser valorizados como materia prima en sectores como la agricultura o la industria. De este modo solo quedan para disposición final los residuos que ya no es posible darles algún aprovechamiento disminuyendo el riesgo de contaminación al ambiente por el volumen que representan. En la Figura 2.13 se ilustra este sistema (Colmer *et al.*, 2013).

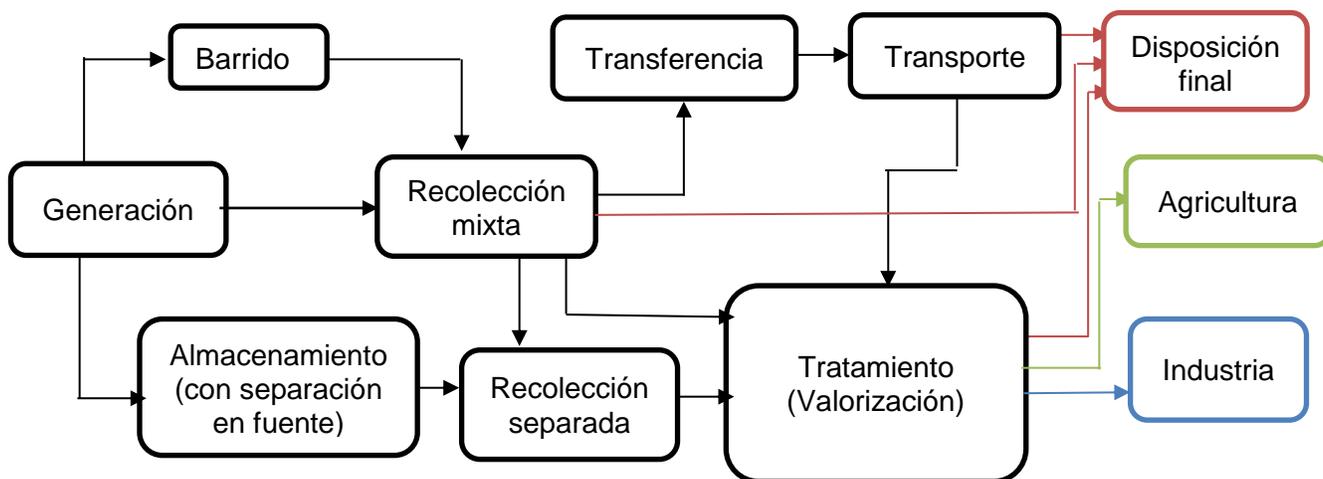


Figura 2.13 Diagrama de un sistema de manejo residuos sólidos con separación en fuente
Fuente: (Elaboración propia a partir de GUIA PMPGIRSU, 2006)

Actualmente la reglamentación en muchas áreas demanda que la separación de materiales reciclables se haga por el residente desde la fuente de generación, en lo que respecta a componentes como papel, aluminio, vidrio y plástico. La separación en la fuente ofrece ventajas porque reduce los costos del procesamiento para la recuperación de los materiales y produce material de mayor calidad (menos contaminado) que las instalaciones centralizadas para la recuperación de materiales, los materiales que se separan en la fuente pueden recogerse ya sea por recolección en las aceras o por entrega por parte de los propietarios en centros locales de depósito y compra. Los programas de recolección en las banquetas, en general reciben una mejor participación del público (entre 50 y 90% de participación de los residentes) que los programas de depósito o compra (Davis *et al.*, 2005).

Separación y procesamiento centralizados

Las técnicas de procesamiento centralizadas de los residuos sólidos son utilizadas para mejorar la eficiencia de los sistemas de gestión de los residuos y para recuperar una mayor cantidad de recursos (materiales reutilizables) y energía eficientemente. Entre las técnicas de procesamiento de residuos más utilizadas se encuentran las siguientes:

- a) *Compactación.* La reducción mecánica del volumen es quizá el factor más importante en la operación de los sistemas de manejo de los residuos sólidos. Por mencionar uno de los beneficios de esta operación se puede afirmar que la vida útil de los rellenos sanitarios se incrementa de manera significativa con la compactación de los residuos, ya que al disminuir su volumen lleva más tiempo llegar a su máxima capacidad. Cuando se compactan los residuos, su densidad final llega a ser de 1100 kg/m³. Esta operación se puede llevar a cabo con vehículos equipados con mecanismos de compactación en la recolección de los residuos o con equipo fijo.
- b) *Incineración.* El volumen de los residuos sólidos puede ser reducido en más de 90% por la incineración. En el pasado la incineración era más común; sin embargo, con las restricciones actuales en cuanto al control de la contaminación del aire, el costo de los equipos se ha elevado considerablemente ya que deben de contar con mecanismos para reducir los contaminantes que se emitan a la atmósfera. Sin embargo, el aumento de los residuos y la escasez de rellenos sanitarios, así como las distancias que se recorren para transportar los residuos, han hecho que los incineradores vuelvan a considerarse como una opción viable para solucionar parte de la problemática de los residuos.
- c) *Separación manual de los componentes:* esta operación se puede llevar a cabo desde el punto de generación, en una estación de transferencia o en el sitio de disposición final. Para recuperar la mayor parte de los materiales reciclables, la separación debe realizarse desde el punto de generación. La cantidad y variedad del material recuperado es muy amplia, entre los más importantes se encuentran el cartón, papel de alta calidad, metales, madera, papel, periódico, latas de aluminio, envases de vidrio. Las oportunidades de reciclado y reventa dependerán de la localidad y el tipo de industrias que haya en la misma, por ejemplo el papel reciclado se puede utilizar para fabricar papel sanitario o para elaborar cuadernos de menor calidad (Arellano *et al.*, 2011).

Sistemas de ingeniería para reciclaje y aprovechamiento de residuos

Estos sistemas pueden ser clasificados en procedimientos físicos, sistemas de recuperación de materiales, recuperación de residuos biológicos, recuperación de productos químicos y sistemas de recuperación de energía.

1. Procedimientos físicos

Los procedimientos físicos se utilizan para recuperar materiales que todavía pueden ser utilizados. Los cuales son: alteración mecánica del tamaño, separación mecánica de los componentes, separación magnética y electromagnética y eliminación de la humedad.

a) Separación mecánica de los componentes

Esta operación se realiza con la finalidad de facilitar el manejo y procesamiento de los residuos y normalmente se lleva a cabo con filtros mecánicos rotatorios. Esta es la etapa previa a los procedimientos como la trituración, ello para que no se mezclen entre sí.

b) Alteración mecánica del tamaño

El objetivo de esta operación es obtener un producto uniforme para un mejor manejo del mismo, éste se puede conseguir con desfibradoras, prensas y trituradoras. Un ejemplo ilustrativo de éste procedimiento es el procesamiento que se le da al papel o al cartón para su reutilización, ya que estos materiales son triturados para volverlos a utilizar.

c) Separación magnética y electromagnética

La separación magnética aplica para la separación de materiales ferrosos que serán reutilizados en la industria de metales. En años recientes, se están comenzando a aplicar técnicas electromecánicas para separar materiales no ferrosos.

d) Eliminación de la humedad

Algunos materiales que se encuentran entre los residuos contienen cantidades considerables de humedad que pueden dificultar su procesamiento, por tanto, es necesario aplicarles técnicas de calentamiento o secado para eliminar esa humedad, la cual se puede conseguir por medio de equipos especiales. Esta técnica se utiliza para el cartón y el papel principalmente.

2. Sistemas de recuperación de materiales

Los sistemas de recuperación de materiales son procesos individuales que se pueden combinar en diferentes alternativas para la recuperación de materiales y para la preparación de residuos para ser utilizados como combustibles alternativos. Se deben considerar tres situaciones importantes: la especificación de materiales a procesar, los sistemas de reciclaje y el diseño de sistemas y rutas.

a) Especificación de los materiales a procesar

Cartón, papel, plásticos, textiles, vidrio, metales ferrosos y no ferrosos son los principales materiales que se encuentran en los RSU que se pueden recuperar. En alguna situación determinada, se debe tomar la decisión de reciclar alguno de estos materiales, la cual se debe basar en una evaluación económica, las características de los materiales y de la situación local.

b) Sistemas de reciclado

Una vez que se tomó la decisión de reciclar materiales o recuperar su energía, se deben desarrollar diagramas de flujo para ilustrar y determinar el camino que seguirán los materiales a recuperar, que estarán en función de las características de los materiales y de la localidad que los genera.

c) Sistemas de reciclado y diseño de rutas

Una vez que se tomó la decisión de reciclar materiales o de recuperar energía, se deben desarrollar diagramas de flujo para ilustrar y determinar el camino que seguirán los materiales a recuperar, que estarán en función de las características de los materiales y de la localidad. El diseño de rutas y sistemas para las instalaciones de las plantas de procesamiento se lleva a cabo fácilmente con la elaboración de diagramas de flujo (Arellano *et al.*, 2011).

3. MARCO LEGAL Y TEÓRICO

En este capítulo se describen el marco legal y teórico. En el marco legal se hace referencia a las leyes y normas relacionadas con la gestión y la valorización de los RSU en la República Mexicana y en el estado de Hidalgo. En el marco teórico se describen los aspectos más importantes acerca del coprocesamiento y el poder calorífico de los residuos sólidos. También se presenta un panorama general sobre la composición y el poder calorífico de los residuos.

3.1 Marco Legal

3.1.1 República Mexicana

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2014)

La LGPGIR, publicada en el diario de la Federación el 8 de octubre de 2003, es una ley reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refiere a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de los residuos, en el territorio nacional. En ella se establecen las bases para aplicar los principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos. Además se establecen los mecanismos de coordinación que, en materia de prevención de la generación, valorización y la gestión integral de residuos, corresponden a la Federación, las entidades federativas y los municipios.

Se considerará como “residuo” conforme a lo contemplado en el artículo cinco de la LGPGIR: *“material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en dicha Ley y demás ordenamientos que de ella deriven”*.

Además en la LGPGIR se estipula, en el artículo primero, que la SEMARNAT debe definir las responsabilidades de los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades de los diferentes niveles de gobierno, así como de los prestadores de servicios en el manejo integral de los residuos; fomentar la valorización de residuos, así como el desarrollo de mercados de subproductos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica y económica, y esquemas de financiamiento adecuados; promover la participación corresponsable de todos los sectores sociales en las acciones tendientes a prevenir la generación y valorización, y lograr una gestión integral de los residuos ambientalmente adecuada, así como tecnológica, económica y socialmente viable. Así mismo, la Ley prevé la elaboración y actualización periódica de diagnósticos básicos, a fin de conocer la cantidad y composición de los residuos, así como la infraestructura disponible para el manejo de cada uno de los tipos de residuos que considera: urbanos, de manejo especial, peligrosos y minero-metalúrgicos.

En la Tabla 3.1, se muestra la descripción y las principales funciones de la legislación a nivel nacional que regula la gestión de los residuos.

Tabla 3.1 Legislación a nivel nacional en materia de gestión de RSU

Ordenamiento	Descripción
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Garantiza el derecho de contar con un ambiente adecuado para el desarrollo y bienestar de los ciudadanos; establece las prerrogativas para que los distintos órdenes de gobierno dicten las disposiciones necesarias para que, dentro de su competencia, aseguren el adecuado manejo y gestión integral de los residuos y se cumpla el derecho de contar con un ambiente adecuado.
Ley General de Salud	Establece entre sus disposiciones, las regulaciones necesarias para combatir los efectos nocivos de la contaminación y factores ambientales en la salud; previniendo y tratando los problemas ambientales que puedan afectar la garantía que consagra esta Ley; promueve el fomento sanitario y el saneamiento ambiental, así como también la minimización de los efectos negativos de los residuos peligrosos, entre otros.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Como ordenamiento regulador de las garantías que otorga la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en cuanto a la protección al ambiente, señala las disposiciones para controlar la contaminación de los suelos y los recursos naturales. Establece las competencias de cada orden de Gobierno para emitir y aplicar las disposiciones que prevengan y controlen esos efectos ocasionados por los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos; Así como dictar las disposiciones necesarias para restablecer y restaurar las condiciones naturales de los suelos contaminados; y la prevención de la contaminación del agua y ecosistemas acuáticos por actividades relacionadas con la disposición de residuos.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Ordenamiento cuyas disposiciones son reglamentarias de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos en el territorio nacional, establece las competencias de los tres órdenes de gobierno para que dicten las disposiciones necesarias para prevenir la generación, fomentar la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	Son instrumentos jurídicos de carácter técnico, de observancia obligatoria en el territorio nacional, en los cuales señalan su ámbito de validez, vigencia y gradualidad en su aplicación; su objeto es dar cumplimiento a las obligaciones establecidas en los reglamentos o en las leyes. Establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros, límites permisibles, procesos, uso de tecnologías que deben observarse en el desarrollo de actividades económicas, en el uso y destino de bienes, en insumos, en procesos, en manejo y clasificación de residuos, selección de sitios, construcción, monitoreo, clausura de sitios de disposición final, todo para proteger la vida, la seguridad y el ambiente.
Normas Mexicanas (NMX)	Son regulaciones técnicas de aplicación voluntaria, las cuales prevén para un uso común y repetido: reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación.

Fuente: (Elaboración propia a partir de LGPGIR, 2014; LGEEPA, 2014)

El Gobierno de la Ciudad de México con la finalidad de fomentar en la sociedad la participación y encauzarla en el cumplimiento de las distintas disposiciones en materia de manejo de residuos sólidos de manera responsable, y como parte de la política ambiental que promueve, estructuró y formuló por medio de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) la norma ambiental NADF-024-AMB-2013, cuyo ámbito de validez es de observancia obligatoria para generadores de residuos ubicados en la Ciudad de México, pero puede emplearse como referente para el correcto manejo de los residuos en otras entidades federativas de México, de acuerdo a las condiciones de cada localidad. Establece los criterios y especificaciones técnicas bajo las cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y valorización de los residuos sólidos, para que se lleve a cabo de acuerdo con lineamientos técnicos que garanticen una adecuada separación primaria, primaria avanzada y secundaria de los materiales, de tal forma que puedan ser valorizados para su reincorporación en procesos de producción, reduciendo la cantidad que llega a sitios de disposición final.

Para lograr los objetivos de la mencionada norma ambiental, los residuos deberán clasificarse para facilitar su separación y facilitar su entrega con el fin de promover su valorización.

Los residuos “inorgánicos con potencial de reciclaje” son aquellos que por sus características tienen las posibilidades técnicas, económicas y ambientales de ser reincorporados a un proceso o tratamiento para permitir su valorización (véase Tabla 3.2)

Tabla 3.2 Residuos inorgánicos con potencial de reciclaje

Clasificación: color gris	
Materiales	Aprovechamientos como:
Papel y cartón*.	Pulpa de papel y cartón.
Plásticos*.	Aglomerados.
Vidrio.	Pellets.
Metales.	Hojuelas.
Ropa y textiles*.	Vidrio.
Maderas*.	Productos metálicos.
Envases multicapas*.	Piezas metálicas varias.
	Estopa.

*Para efectos de esta norma estos residuos son incluidos en este grupo para hacer más eficiente su separación y promover su valorización.

Fuente: (Elaboración a partir de NADF-024-AMBT-2013)

Dicha norma en su apartado “residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado” se refiere aquellos residuos que por sus características y los usos que se les han dado, pierden o dificultan las posibilidades técnicas y económicas de ser reincorporados a un proceso o tratamiento con potencial de reúso o reciclaje.

En la Tabla 3.3 se muestran algunos ejemplos de residuos denominados “inorgánicos” en la NADF-024-AMB-2013, para los que actualmente no se ha potencializado su aprovechamiento.

Tabla 3.3 Residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado

Clasificación: Color Naranja	
Materiales	Posible aprovechamiento o aplicación
Residuos sanitarios. Pañuelos usados. Papel de baño. Preservativos. Toallas sanitarias. Cotonetes. Cintas adhesivas. Pañales. Plásticos de difícil aprovechamiento. Plásticos con aditivos degradantes (oxo, foto y termo degradables). Celofán. Poli papel. Poliestireno expandido (Unicel). Bolas de frituras. Calzado. Hule. Bolígrafos, plumones, lápices. Filtros de aspiradora. Filtros de aire y de agua. Colillas de cigarro. Chicles. Residuos de rechazo.	Valorización energética mediante tratamiento térmico (coprocesamiento).

Fuente: (Elaboración a partir de NADF-024-AMBT-2013)

En dicha norma se indica que los materiales deben ser separados desde la fuente para evitar que contaminen los residuos biodegradables, los residuos con potencial de reciclaje o los especiales o voluminosos, y deberán ser entregados por el generador al servicio público de limpia en forma separada, atendiendo a los lineamientos que la autoridad correspondiente disponga para la recolección selectiva, la cual establecerá utilizando uno o más de los siguientes criterios:

- ❖ Contenedor que permita identificar plenamente los residuos contenidos.
- ❖ Contenedores con los colores establecidos dentro de esta norma ambiental.

Es importante mencionar que la NADF-024-AMBT-2013 emplea el término de “residuos inorgánicos” y paralelamente CEMEX maneja el término “FIRSU” para referirse a la fracción inorgánica de los RSU; sin embargo, se incluyen dentro de dichos residuos materiales como plásticos, papel, cartón y textiles. Considerando su composición, dichos materiales son orgánicos, las razones por las que los incluyen es para evitar se contaminen con otros materiales orgánicos de rápida descomposición, para hacer más eficiente su separación y promover su valorización. En particular CEMEX incluye principalmente aquellos residuos que no sea posible reusar o reciclar y cuyo último fin sean los sitios de disposición final, dando cumplimiento a la jerarquía para el aprovechamiento de los residuos.

En México se disponen los RSU en rellenos sanitarios y basureros a cielo abierto, motivo por el cual se creó la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME.

La NOM-040-SEMARNAT-2002 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, monóxido de carbono, metales pesados, dioxinas y furanos, hidrocarburos totales y ácido clorhídrico provenientes de fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento hidráulico, que utilicen combustibles convencionales o sus mezclas con otros materiales o residuos empleados como combustibles alternativos y es de observancia obligatoria para los responsables de las mismas según su ubicación.

3.1.2 Estado de Hidalgo

Teniendo como eje rector el plan estatal de desarrollo 2011-2016 y el plan sectorial en los cuales se establecen las políticas públicas, objetivos, estrategias y líneas de acción encaminadas al manejo integral de residuos, desarrollo de la gestión integral de residuos sólidos con un enfoque integral (generación, recolección, traslado, tratamiento, reciclaje y disposición final) se publicó en el periódico oficial, la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Hidalgo -LPGIR, 2011- (GIRESO, 2012).

Esta Ley tiene por objeto regular la generación, el aprovechamiento y la gestión integral de los RSU y RME que no estén expresamente atribuidos a la Federación; la prevención de la contaminación y la remediación de suelos contaminados con residuos, de conformidad con lo que establece la LGPGIR.

En el nivel estatal se encuentra la Constitución Política del Estado, en la parte dedicada al municipio libre, estipula que las leyes orgánicas municipales determinarán los servicios públicos que serán competencia de la administración municipal, siendo éstos los mismos que establece la fracción del artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La LPGIR, 2011 del estado de Hidalgo, contiene en su capítulo IV y V los lineamientos a seguir para la selección y el aprovechamiento de RSU y RME.

Por otra parte la norma técnica estatal ambiental del Estado de México NTEA-013-SMA-RS-2011, se puede tomar como referente para aplicarla como guía normativa en el estado de Hidalgo (considerando las características de cada entidad), ya que es la única a nivel estatal que establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de RSU y RME.

En la Figura 3.1 se muestra la revisión de la normativa existente relacionada con el manejo integral de los RSU y que establecen los criterios y especificaciones para su correcta valorización. Actualmente constituyen el marco jurídico en el manejo de residuos tanto a nivel federal y estatal, en México e Hidalgo respectivamente.

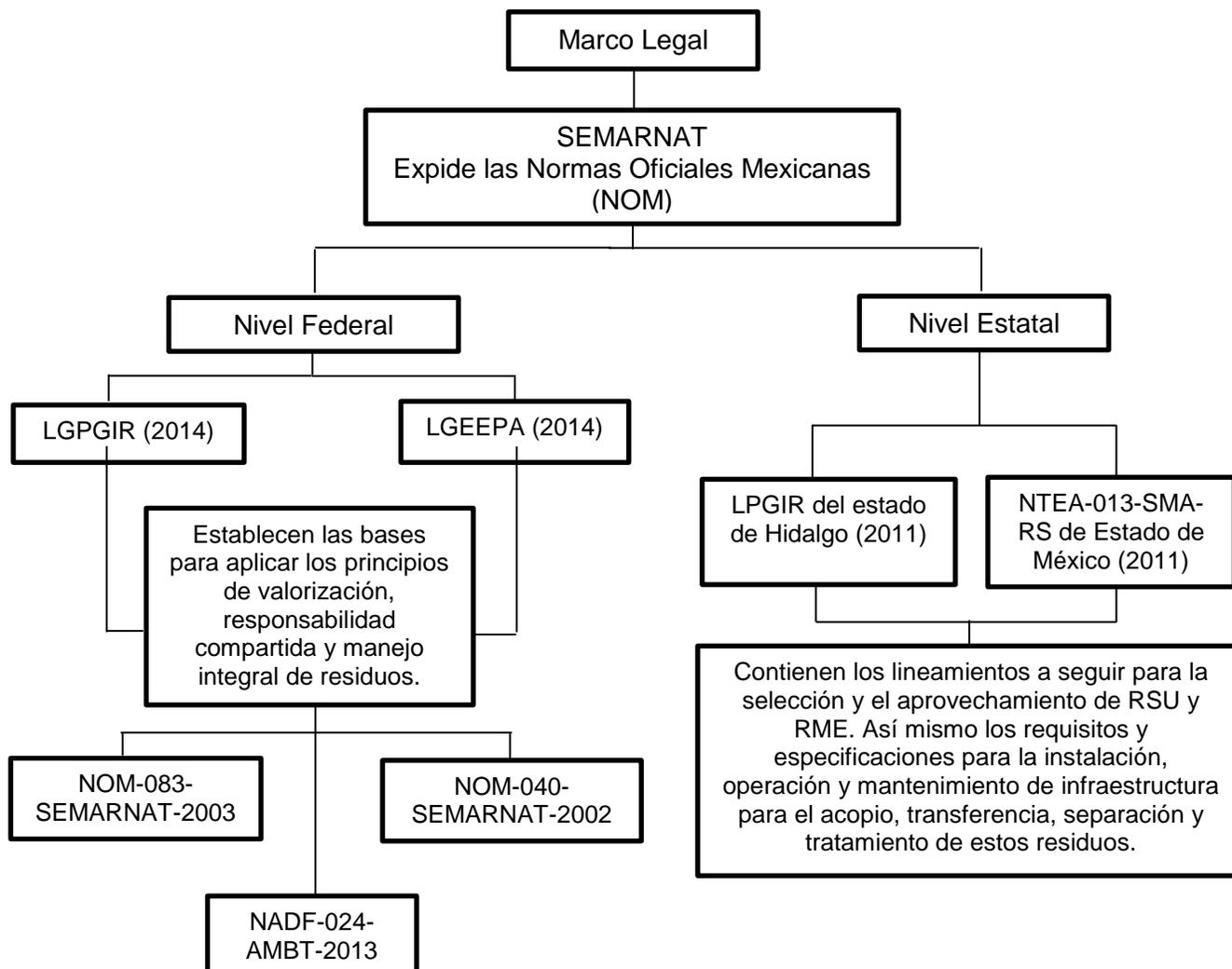


Figura 3.1. Leyes y reglamentos que regulan el manejo de los RSU en México y en Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de LGEEPA 2014; LGEPGIR, 2014; NOM-083-SEMARNAT-2003;
NOM-040-SEMARNAT-2002; LPGIR del estado de Hidalgo, 2011; NTEA-013-SMA-RS-2011)

3.2 Coprocesamiento y poder calorífico de los RSU utilizados como combustibles alternativos en hornos cementeros

El proceso de fabricación de cemento es un proceso con un consumo intensivo de energía, debido fundamentalmente a las altas temperaturas que es necesario alcanzar para el correcto desarrollo del mismo y en las operaciones de molienda, la energía que se utiliza es a partir de combustibles fósiles.

El consumo energético depende de las materias primas empleadas y sobre todo de la tecnología y del sistema de alimentación empleados. En estas circunstancias el consumo de combustibles en el horno rotatorio de clínker se sitúa entre 700 y 1,300 kcal/kg de clínker (3,000 a 5,500 MJ/t), lo que equivale a 100 y 185 kg de coque por tonelada de cemento. Tradicionalmente esta energía se ha suministrado mediante distintos combustibles fósiles, como carbón, coque de petróleo, fueloil y gas natural. Los RSU que se sometan a un pretratamiento también pueden ser utilizados como combustibles en los hornos cementeros, aprovechando la energía calorífica que contienen (Cedano, 2012).

La cuestión que se plantea ante la utilización de determinados residuos como sustitutos de los combustibles tradicionales y de las materias primas, es como se verá afectado el entorno, las condiciones ambientales en las inmediaciones de las fábricas y la utilización de residuos como materias primas de sustitución o como combustibles alternativos, no debe producir efectos apreciables sobre el proceso ni sobre el ambiente, por lo cual se deben respetar unas adecuadas especificaciones.

Así los combustibles alternativos han de tener limitado el contenido en determinados elementos como cloro, metales pesados para garantizar la estabilidad del proceso y limitar los posibles impactos ambientales.

Las emisiones a la atmósfera más importantes en la fábrica de cemento provienen del horno de clínker, y se originan en las reacciones químicas y físicas provocadas por la cocción de las materias primas y por los procesos de combustión, por lo que lo más adecuado es realizar también un control riguroso de todos los materiales que se introducen en el proceso, garantizando de esta forma que no se perjudicará al propio proceso, la calidad del producto final y el ambiente.

3.2.1 Coprocesamiento de RSU

Existe una gran necesidad de encontrar una opción viable para el manejo de los residuos que se generan en diversos sectores de la sociedad; se han desarrollado varias posibilidades tecnológicas, como los tratamientos biológicos, mecánico-biológicos y térmicos.

En particular, la tecnología de tratamiento térmico de los residuos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos gaseosos, líquidos y sólidos con la subsiguiente emisión de energía en forma de calor. Entre las tecnologías de procesamiento térmico destacan:

- ❖ La incineración. Se refiere básicamente a la combustión de materia orgánica mediante el proceso de oxidación térmica que se lleva a cabo en presencia de oxígeno dentro de un rango de temperaturas entre 800 y 1,800 °C.
- ❖ La gasificación. Es un tratamiento térmico que se lleva a cabo a altas temperaturas (alrededor de 2,000 °C) en el cual se inyecta aire (oxígeno) para producir residuos mineralizados y gas de síntesis.

- ❖ La pirólisis. Es la degradación térmica de residuos sólidos urbanos que ocurre a temperaturas entre 400 y 800°C en ausencia de oxígeno para evitar su gasificación.
- ❖ El plasma. Es el proceso que permite generar energía y diversos productos que pueden aprovecharse. Sin embargo, su desarrollo se encuentra todavía en una fase inicial, ya que es un proceso caro. Se lleva a cabo dentro de un rango de temperaturas entre 3,000 y 20,000 °C.

Actualmente, no se cuenta con suficiente información práctica sobre la operación de estas tecnologías en México como para determinar la factibilidad técnica de su instrumentación; sin embargo, se sabe que a nivel experimental se han aplicado la incineración, plasma y gasificación asistida por arco de plasma, obteniendo resultados muy favorables para esta última, con la cual se logra hasta el 92% en la reducción del peso y 97 % en la reducción del volumen, además de que es posible generar y aprovechar la energía en el mismo proceso, no obstante, el principal inconveniente es que su operación resulta costosa (Rojas-Valencia, 2012).

De manera paralela se ha desarrollado otro método térmico denominado coprocesamiento, el cual es un tratamiento que aprovecha los RSU como fuente de energía, reemplaza los recursos minerales naturales y combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas.

La diferencia entre el coprocesamiento y la incineración convencional, es que en el primero se aprovecha la energía y los minerales que están presentes en los residuos, debido a las altas temperaturas en el orden de 2,000 °C; el tiempo de residencia de los gases a altas temperaturas es mayor a 5 segundos, se realiza un proceso de auto limpieza de los gases debido a que se genera una atmósfera alcalina, logrando que las cenizas se reintegren al proceso de fabricación de cemento, mientras que en la incineración los residuos generan cenizas que posteriormente requieren un tratamiento seguro.

Debido a que la cantidad de la ceniza generada por la combustión de los residuos es mínima, es posible incorporarla en el proceso de fabricación de cemento. Es importante mencionar que la composición de los óxidos de la ceniza que resulta del proceso de combustión es compatible con la composición clínker, lo cual cierra el ciclo de coprocesamiento y no afecta la calidad de las propiedades de la materia prima del cemento.

La LGPGIR, 2014 en su artículo 5, numeral IV, menciona que en el coprocesamiento se realiza una integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, mediante su empleo como combustible alternativo para la generación de energía, la cual puede ser aprovechada en la producción de bienes y servicios. Esta ley marca que deberán distinguirse los residuos cuyas características, volúmenes de generación, acumulación, problemas ambientales, impactos económicos y sociales para su manejo inadecuado pudieran ser objeto de coprocesamiento. A su vez, deberán establecerse restricciones a la incineración o al coprocesamiento mediante combustión de residuos susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos, cuando éstos estén disponibles, sean ambientalmente eficaces, así como tecnológicamente y económicamente factibles. Solo así se deberán promover acciones que tiendan a fortalecer la infraestructura de valorización o tratamiento de estos residuos por otros medios.

Cuando la actividad de coprocesamiento se lleva a cabo bajo el criterio descrito en su definición “integración ambientalmente segura”, el resultado esperado sería el de un beneficio a la salud y al ambiente ya que se estaría eliminando el residuo como una fuente potencial de riesgo y se incrementaría su potencial de aprovechamiento energético.

Situación actual del uso del coprocesamiento en el mundo

En el mundo se coprocesan más de 10 millones de toneladas de residuos al año desde hace más de 30 años, Japón, Estados Unidos, Canadá y miembros de la UE han utilizado el coprocesamiento como una opción ambientalmente sostenible y económicamente viable en sus procesos productivos. La industria cementera en Alemania, Bélgica, Austria, Suiza, España, Inglaterra y Polonia sustituyen actualmente más del 40% de sus combustibles por residuos acondicionados especialmente para estos efectos; en Holanda, esta situación es de más del 80 %. En América Latina, la situación en Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Colombia, Guatemala, México y República Dominicana, entre otros va desde el 7 hasta el 18% (CEMA, 2009).

En la Figura 3.2 se muestra un cálculo realizado por la European Cement Research Academy, el cual establece que para el año 2030 los países desarrollados habrán alcanzado entre 40 y 60% de utilización de combustibles alternativos, mientras que países en vías de desarrollo lograrán emplear entre 25 y 35% para el año 2050 (CEMA, 2009).

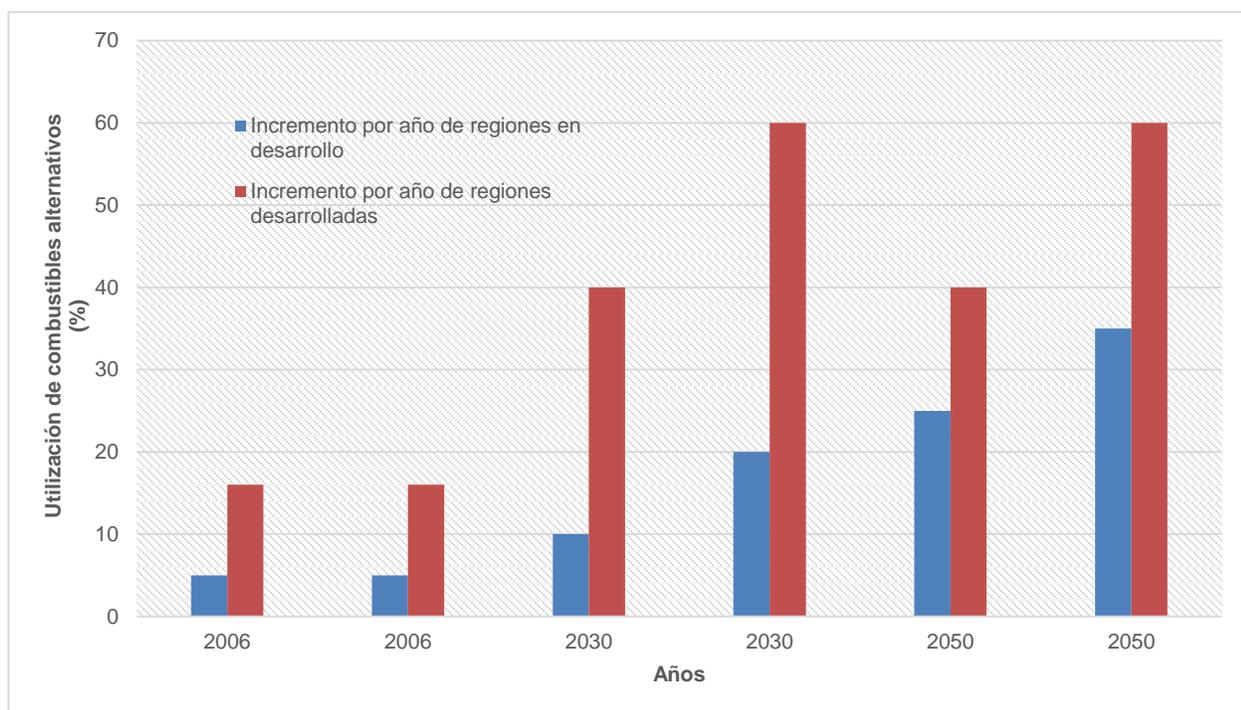


Figura 3.2 Cálculo de la estimación del uso de combustibles alternativos en el mundo, en países desarrollados y en vías de desarrollo

Fuente: (Elaboración propia a partir de CEMA, 2009)

En la Figura 3.3 se muestra a través del triángulo jerárquico el alcance que buscan diversas organizaciones e industrias a nivel global en sustituir la disposición final de los residuos en rellenos sanitarios o basureros, primeramente evitando y minimizando la generación del residuo, a través de la recuperación de materiales (reúso y reciclaje) y la sustitución de combustibles fósiles por el uso de combustible alternativos a través del coprocesamiento.



Figura 3.3 Jerarquía de alternativas para el aprovechamiento de los residuos
Fuente: (Elaboración propia a partir de CMIC, 2011)

Según las características del proceso de producción, la industria cementera puede coprocesar:

- Combustibles alternativos que tengan un importante poder calorífico (como aceites usados).
- Materias primas alternativas que contengan componentes minerales adecuados para la producción de clínker o cemento (tal como suelos contaminados).
- Materiales que aporten poder calorífico y proporcionen, al mismo tiempo, componentes minerales, como la FIRSU (Queiroz, *et. al*, 2012).

Una fuente importante de material utilizado en el coprocesamiento son los RSU, en especial la fracción de origen orgánico de lenta degradación. La combustión de los RSU consigue una reducción entre el 85 al 90% de su volumen y la ceniza resultante se puede reincorporar como materia prima para la producción de cemento (Choy *et al.*, 2004).

Una coprocesadora de residuos sólidos funciona de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 3.4:

1. Antes de ser procesados, los residuos pasan por una fase de análisis en un laboratorio; se realizan análisis para determinar su humedad, poder calorífico, cloro, azufre, metales pesados, etc.
2. Los residuos seleccionados pasan posteriormente a la fase de pretratamiento, donde son triturados para reducir su tamaño; se utiliza una trituradora para alcanzar un tamaño aproximado de 5 x 5 cm y un selector de tamaños. Los residuos son llevados al horno en la banda transportadora; finalmente, el centro de operaciones de la planta conduce los materiales al horno cementero.
3. Por último, producto del coprocesamiento de la caliza empleando combustibles alternativos y tradicionales se obtiene el clínker (principal componente del cemento), el cual se enfría, almacena y se muele para fabricar el cemento Portland.

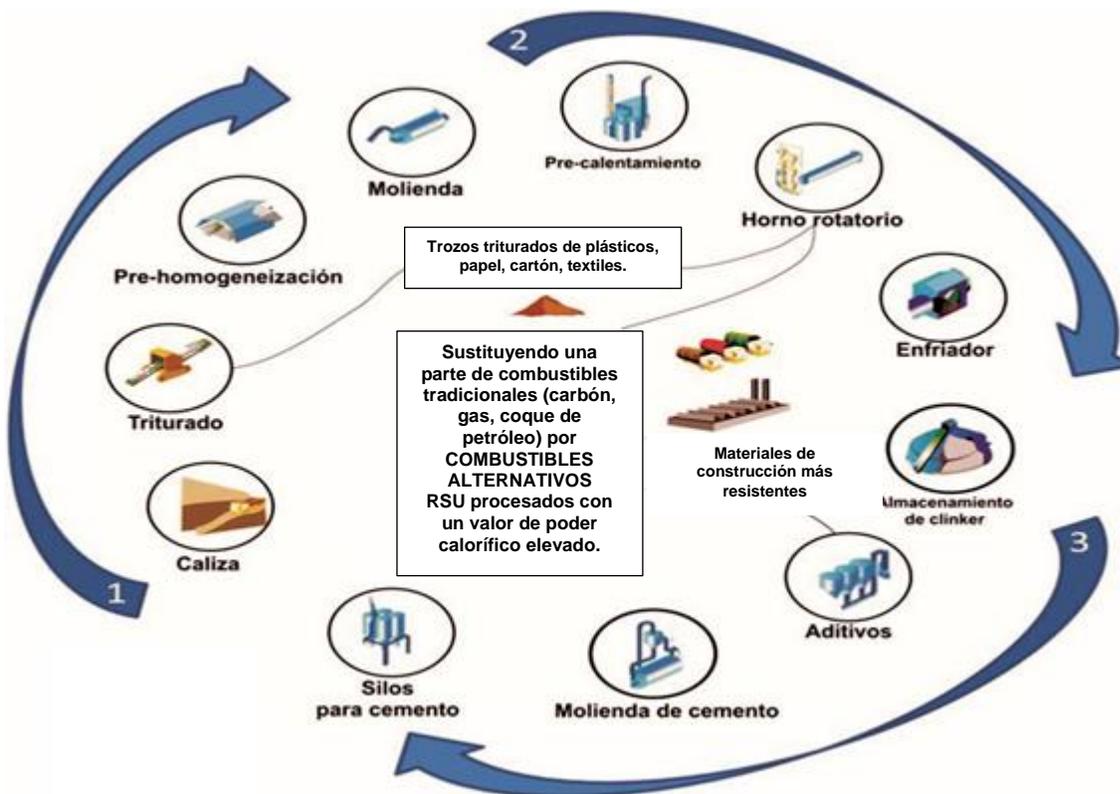


Figura 3.4 Desarrollo del funcionamiento del coprocesamiento de RSU en cementeras
Fuente: (Adaptado de Rojas-Valencia *et al.*, 2014)

La utilización de residuos como combustibles alternativos disminuye la dependencia energética de los combustibles tradicionales. Así mismo aprovechando su potencial calorífico a través del coprocesamiento proporciona numerosos beneficios, entre los que destacan una menor necesidad de explotación de recursos no renovables y la disminución de la huella medio ambiental provocada por tales actividades (ver detalles en la Figura 3.5).

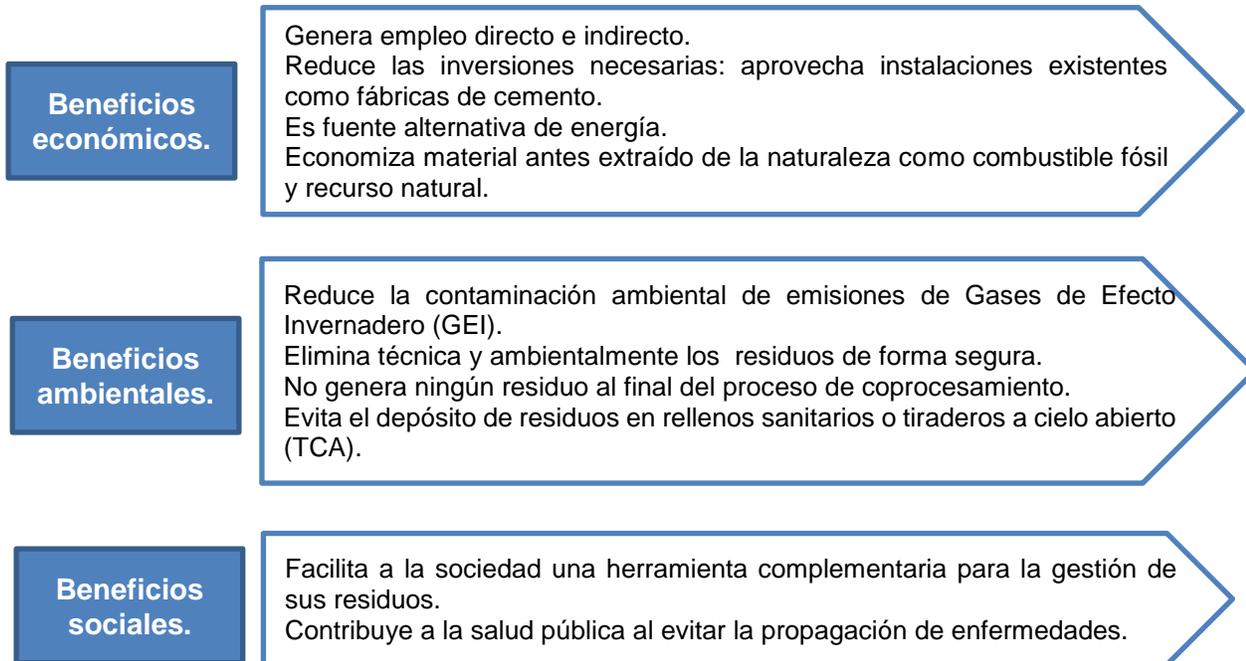


Figura 3.5 Beneficios que aporta el coprocesamiento
Fuente: (Elaboración propia a partir de Rojas-Valencia *et al.*, 2014)

3.2.2 Poder calorífico de los residuos

Los residuos son una fuente de energía importante cuyo valor energético puede explotarse a través de procesos térmicos como la incineración y el coprocesamiento o el aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios y digestores anaerobios. Los residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente son aquellos que tienen en su composición materia orgánica (compuesta básicamente por carbono e hidrógeno) que, cuando se oxida con el oxígeno de la atmósfera, aporta el calor de combustión (Cedano, 2012).

Un factor importante para la generación de energía a partir del tratamiento de los RSU es el contenido energético o poder calorífico, el cual indica la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo, para así saber si el residuo es apto para producir energía o sólo consumirá una mayor energía y hará que el proceso sea menos rentable.

Los residuos gozan de una ventaja económica con respecto a muchos recursos de biomasa debido a que periódicamente su recolección se realiza con fondos públicos, a través de una infraestructura establecida, por una industria con experiencia en el transporte, la manipulación y el procesamiento de diversos flujos de residuos sólidos. Las tecnologías modernas para la obtención de energía a partir de residuos y para la recuperación del gas de rellenos sanitarios están desarrolladas, no afectan al ambiente y han sido aplicadas con éxito en muchos países, si son llevadas a cabo en condiciones controladas de seguridad.

A nivel global, más de 130 millones de toneladas de residuos se incineran cada año en más de 600 plantas de generación de energía a partir de residuos. El valor calorífico de los RSU combinados va de 6 a 14 MJ/kg. El contenido total de energía de los residuos se explota en forma más eficiente a través de los procesos térmicos. En el transcurso de la combustión, la energía se obtiene directamente tanto de fuentes de la biomasa (residuos de papel, madera, materiales textiles naturales y alimentos) y de carbón fósil (llantas, plásticos y materiales textiles sintéticos) (Queiroz *et al.*, 2013).

En México existen diferentes plantas cementeras que utilizan el poder calorífico de los residuos como combustible o materia prima alterna a través del coprocesamiento. Según las características del proceso de producción, la industria cementera puede coprocesar:

Materiales empleados en el coprocesamiento

- a) Combustibles alternativos que tengan un importante poder calorífico, como se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Capacidad calorífica de RSU

Tipo de residuo	Capacidad calorífica (MJ/kg)		
	Según se recoge, capacidad calorífica inferior.	Seco, normal, sin agua.	Seco, sin cenizas, capacidad calorífica superior.
Alimentos mezclados	4.2	13.9	16.7
Grasas	37.4	38.2	39.1
Fruta	4	18.6	19.2
Carne	17.6	28.9	30.4
Papel mezclado	15.7	17.6	18.7
Periódicos	18.5	19.7	20
Cartón	26.2	27.1	27.4
Plásticos mezclados	32.7	33.4	37.1
Poliétileno	43.4	43.4	43.9
Poliestireno	38.1	38.1	38.1
Poliuretano	26	26	27.1
PVC	22.5	22.5	22.7
Textiles	18.3	20.4	22.7
Restos de jardín	6	15.1	15.1
Maderas mezclada	15.4	19.3	19.3
Vidrio	0.2	0.2	0.15
Metales	0.7	0.7	0.7
RSU domésticos	11.6	14.5	19.3
RSU comerciales	12.8	15	-
RSU	10.7	13.4	-

Fuente: (Elaboración propia a partir de Rojas-Valencia *et al.*, 2014)

- b) Materias primas alternativas que contengan componentes minerales adecuados para la producción de clínker o cemento, los cuales se indican en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Capacidad calorífica de combustibles de uso común

Combustible	Capacidad calorífica (MJ/kg)
Coque	33.488
Gas natural	48
Fuel-oil	44
Hulla	29
Lignito	20

Fuente: (Elaboración propia a partir de Rojas-Valencia *et al.*, 2014)

- c) Materiales que aporten poder calorífico y proporcionen al mismo tiempo componentes minerales como escorias de hornos, humo de sílice, arcillas, puzolanas industriales, etc.

La mayoría de los RSU pueden ser utilizados en los hornos como opción de combustible debido a que su valor calorífico mínimo es de 10.70 MJ/kg, inferior al de los combustibles de usos común, pero cabe señalar que es importante tomar en cuenta la relación del valor de su poder calorífico respecto a su volumen (Queiroz *et al.*, 2013).

La composición de los RSU varía considerablemente en función de la localización de su recolección en el mundo, y por lo tanto, también su poder calorífico. En los países en vías de desarrollo, la fracción de los residuos que consiste en materiales fabricados, como el papel, los metales, plásticos y vidrio, es relativamente pequeña, lo que significa que el porcentaje de restos de comida es alto, generalmente por encima del 40%. Puesto que los residuos de alimentos tienen una densidad energética baja, el poder calorífico de los RSU en los países en vías de desarrollo tiende a ser menor que el de los países más industrializados (Masters *et al.*, 2008).

En México desde el año 2011 se comenzó a desarrollar una estrategia para el coprocesamiento de combustibles alternativos a partir de la FIRSU. En este año, se sustituyó 17% de los combustibles convencionales utilizados, por la FIRSU (CEMEX, 2012).

En 2011 se generaron 3.60 millones de toneladas de residuos de papel, cartón, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos aeroportuarios, y 91% de neumáticos fuera de uso en la Ciudad de México (INECC-SEMARNAT, 2012).

Algunos RME también pueden ser utilizados en el coprocesamiento, por ejemplo, 68 % de residuos generados en hoteles pueden usarse como combustible alterno, al igual que los residuos constituidos de petróleo, debido a que gran parte de ellos contienen aceites que aportan un alto poder calorífico, como los desechos sólidos contaminados con hidrocarburo, lodos aceitosos y aceites lubricantes usados. Sin embargo, no han sido empleados en su totalidad para ello (INECC-SEMARNAT, 2012).

Los que no son apropiados para el coprocesado en las plantas cementeras son los residuos hospitalarios infecciosos y sanitarios, las baterías y los RSU no tratados (CEMA, 2009).

3.2.3 Estudios acerca de los beneficios ambientales relacionados con el uso de residuos como combustibles alternativos

A continuación se detallan algunos estudios en los que diversas instituciones de la comunidad científica nacional e internacional muestran que el uso de combustibles derivados de residuos no modifican las emisiones de las fábricas de cemento ni suponen ningún riesgo adicional para la seguridad y salud de las personas, así como impactos al ambiente. Los estudios son los siguientes:

1. *Los documentos y estudios realizados en el marco del Convenio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), sobre contaminantes orgánicos persistentes.*

Estos estudios concluyen que el uso de residuos como combustibles alternativos en unas condiciones determinadas (y establecidas por la normativa europea) no suponen un incremento en las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes, en concreto, de dioxinas y furanos.

2. *Ejemplo práctico de valorización energética de neumáticos fuera de uso (NFU).*

La experiencia demuestra que los neumáticos usados pueden sustituir combustibles fósiles, como carbón o petróleo, sin un incremento significativo en las emisiones (véase Tabla 3.6), y que las buenas prácticas en la combustión y el uso adecuado de sistemas de control de emisiones son esenciales para mantener las emisiones en la chimenea en el mismo nivel que el nivel o menor al de las emisiones procedentes del uso de combustibles fósiles (Cedano, 2012).

Tabla 3.6 Emisiones medidas de la combustión de prueba de NFU en un horno cementero en España

Contaminantes	Combustibles fósiles (carbón y coque)	Combustibles fósiles y 15% de neumáticos
mg/m ³ de partículas totales	60	60
mg/m ³ de NO _x	1180	800
mg/m ³ de SO _x	500	500
mg/m ³ de CO _x	985	948
mg/m ³ de Cloro y flúor	1.13	1.0
mg/m ³ de COVs	129	68
ng/m ³ Dioxinas	0.12	0.03

Fuente: (Elaboración propia a partir de Cedano, 2012)

3. *Evaluación comparativa de los impactos ambientales de la producción de clínker con combustible fósil frente a combustible derivado de los residuos municipales en la planta cementera Tepeaca, Puebla.*

Un estudio realizado (Güereca, 2013) con base en el análisis de datos reales de la gestión de residuos provenientes de la Ciudad de México en la Planta Tepeaca de CEMEX, en el Estado de Puebla, analizó la sustitución de coque de petróleo por residuos municipales con alto poder calorífico como combustible para los hornos que se usan en la elaboración de cemento.

El estudio tuvo como objetivo desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo de la producción de clínker, usando coque de petróleo como combustible, frente a una mezcla de coque con FIRSU. El clínker es el material que da origen al cemento y que proviene del procesado de una mezcla de arcilla y caliza, mediante su calcinación en el interior de un horno.

Este proceso requiere un importante consumo de energía, debido a que los hornos en que se produce el Clinker deben mantener a una temperatura constante, alrededor de 1,450 °C, con flamas cuyas temperaturas alcanzan los 2,000 °C.

Los escenarios evaluados en este estudio son un escenario base, que considera como combustible 100 % coque de petróleo, y un escenario FIRSU, en el cual se asume el uso de 80 % coque de petróleo y 20 % FIRSU. Para los dos casos se contó con datos reales de la planta de cemento de CEMEX en Tepeaca, Puebla, y de la gestión de residuos de la ciudad de México, que actualmente proporciona el FIRSU a Tepeaca.

La unidad funcional del ACV fue la producción de una tonelada de clínker. Se tomaron en cuenta los consumos de materia prima, agua, energía, emisiones al aire, descargas al agua y generación de residuos de cada uno de los procesos unitarios del ciclo de vida del clínker (cantera, molienda, homogenización y horno), de los combustibles utilizados y del transporte de los materiales.

La composición de los residuos utilizados fue de 32% de plásticos, 50% de papel y cartón, 10% de textiles y 8% de madera. Las categorías de impactos ambientales evaluadas fueron acidificación, disminución de recursos abióticos, eutrofización, deterioro de la capa de ozono, calentamiento global, toxicidad humana, toxicidad terrestre y formación de foto-oxidantes.

En términos porcentuales, en los impactos para los dos escenarios analizados se concluyó que el escenario FIRSU muestra un mejor desempeño ambiental para todas las categorías de impactos analizadas. Entre ellos, el indicador de calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono, así como la reducción de un 10% en la emisión de GEI (gases de efecto invernadero).

Los resultados señalan que la sustitución de coque de petróleo por residuos municipales con alto poder calorífico en hornos de cemento es una opción ambientalmente favorable, debido principalmente a cuatro razones:

1. Se evita la disposición de una gran cantidad de residuos en rellenos sanitarios, y de esta forma permite su aprovechamiento y la mitigación de impactos ambientales.
2. Se disminuye la emisión de algunos compuestos con efectos ambientalmente adversos, a causa de las altas temperaturas y el tiempo de residencia en el horno.
3. Se disminuye el uso del coque, y con ello los impactos asociados con el proceso de refinación.
4. Se disminuye el agotamiento de combustibles fósiles al sustituir el uso de coque de petróleo por residuos (Güereca, 2013).

4. METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolló para la elaboración de este trabajo se dividió en dos etapas: trabajo de gabinete e investigación de campo. En la primera se realizó un estudio documental de la normativa y la gestión de los RSU en México, localización de los sitios encargados del manejo de los RSU y las plantas cementeras que operan en el estado de Hidalgo y proyección de RSU en los municipios del estado de Hidalgo con una población mayor a 45 000 habitantes. En la segunda etapa se realizó la cuantificación del poder calorífico de las pacas FIRSU que llegan a la planta de CEMEX en Huichapan, Hidalgo, análisis de las tecnologías y equipos que se requieren para la operación del CP-FIRSU, la georreferenciación de los sitios de manejo de RSU y las plantas cementeras que pudieran ser clientes potenciales para el consumo de las pacas FIRSU y elaboración de una evaluación multicriterio para determinar la ubicación factible del sitio para la instalación del CP-FIRSU optimizando en términos económicos las rutas de transporte de residuos mediante un análisis fuente-destino.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología de este trabajo, la cual se estructuró en dos etapas y estas a su vez se subdividieron en siete fases:

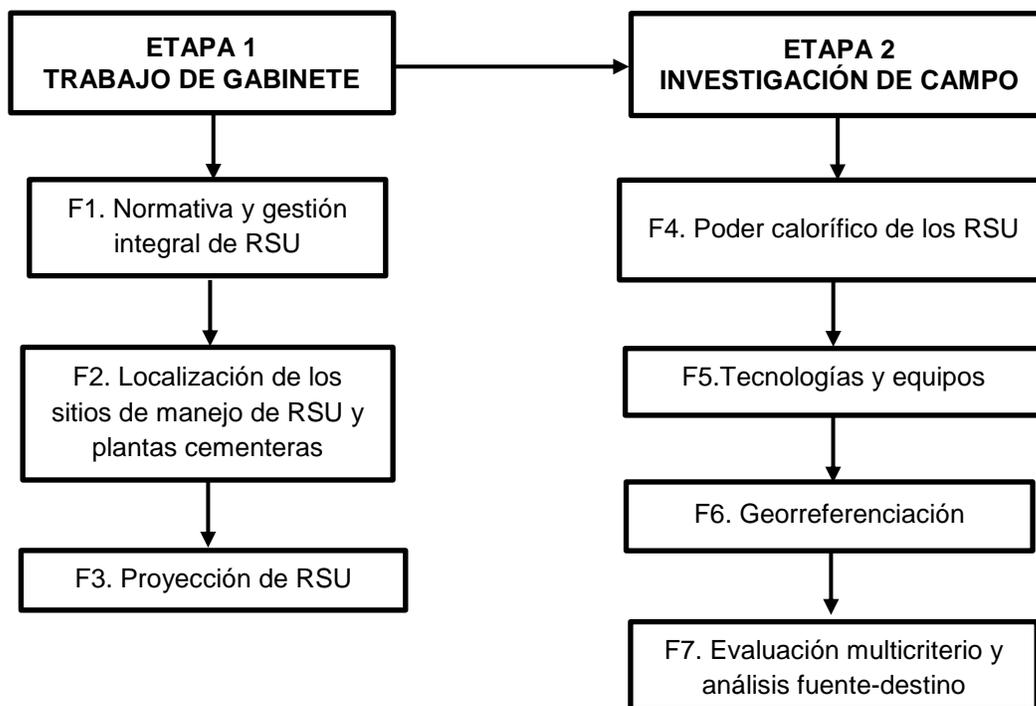


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología del trabajo de tesis

A continuación se detalla el desarrollo de cada una de las fases de la metodología:

4.1 Primera fase. Revisión de la normativa y el estado del arte de la gestión integral de los RSU en la República Mexicana y en el estado de Hidalgo.

Se realizó un estudio documental en:

- ❖ Base de datos de dependencias como la SEMARNAT, tomando en cuenta las normas relacionadas en México, con el equilibrio ecológico y la protección del ambiente; así como la gestión integral de los RSU, aprovechamiento de residuos, emisión de contaminantes y los sitios de disposición final.
- ❖ Base de Datos de INEGI de estudios o reportes que aporten cifras en el manejo de los RSU.
- ❖ Base de datos de la UNAM de artículos o libros que se enfoquen en la gestión integral de los RSU.

4.2 Segunda Fase. Localización de los sitios de manejo de RSU y plantas cementeras que operan en Hidalgo.

Se realizó una investigación en conjunto con el apoyo de la Secretaría de Servicios Públicos Municipales y la Secretaría de Medio Ambiente del estado de Hidalgo (SEMARNATH) para conocer la infraestructura de manejo de RSU con la que cuenta el estado de Hidalgo, así como los clientes potenciales para el consumo de las pacas FIRSU, principalmente las plantas cementeras, se analizó principalmente su localización, infraestructura y su capacidad de operación. Esta fase fue clave debido a que con base en este análisis preliminar, se logró delimitar el área de estudio para determinar la ubicación factible del CP-FIRSU.

4.3 Tercera Fase. Proyección de la generación de RSU en municipios con población mayor a 45 000 habitantes.

Para lograr asegurar la capacidad de recepción de los RSU que lleguen al CP-FIRSU, se realizó la proyección de residuos a través del método aritmético y geométrico en un periodo de 10, 20 y 30 años.

Primeramente se realizó la proyección de la población. Se consideraron las tasas de crecimiento establecidas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

Se revisó la generación de residuos sólidos a partir de datos oficiales de fuentes como: INEGI, SEDESOL, INECC.

Se revisó la composición de los residuos a partir de datos oficiales de fuentes confiables como: INEGI, SEDESOL, INECC, etc., y por medio de este valor en combinación con el de la proyección de generación de residuos se determinó la cantidad y el tipo de residuos aprovechables en la zona de estudio.

La proyección de la cantidad de residuos aprovechables es básica para determinar la capacidad de la infraestructura del CP-FIRSU, su diagrama de proceso y la inversión que se requiere para su instalación.

4.4 Cuarta Fase. Identificación y cuantificación de los RSU con alto poder calorífico.

Se identificaron cuáles son los RSU con alto poder calorífico que pueden ser aprovechados como combustibles alternativos en las cementeras o cualquier otra industria que los requiera, se investigó en artículos científicos cuanto es su poder calorífico y en qué cantidad se pueden disponer, debido a que es muy importante tomar en cuenta la relación de poder calorífico respecto a su volumen. Así mismo los residuos que puedan ser destinados para su óptimo reúso y reciclaje o que se les pueda dar otro aprovechamiento.

Se realizó junto con la empresa CEMEX estudios para obtener el poder calorífico de diferentes muestras de las pacas FIRSU que llega a la planta cementera de Huichapan, Hidalgo. Se aplicó el método de cuarteo a las pacas FIRSU, para obtener una muestra representativa de residuos y realizar el análisis de su poder calorífico en las instalaciones de los laboratorios de dicha empresa.

4.5 Quinta Fase. Análisis de las tecnologías y equipos que se requieren para la operación del CP-FIRSU.

En esta fase se analizó información especializada en el ámbito nacional e internacional sobre las diferentes tecnologías y equipos que se requieren en la operación de un CP-FIRSU.

Se realizaron visitas técnicas a la planta de selección de San Juan de Aragón y a la planta empacadora de Iztapalapa, para hacer un análisis de los equipos que emplean en sus procesos y como está conformada su infraestructura, para establecer los diagramas de flujo de los procesos, arreglo general en planta y la modelación del CP-FIRSU. Con los datos de ingeniería básica que se analizaron, se realizó su propuesta de distribución y se determinó el costo de las tecnologías y equipos que conformarían su infraestructura.

4.6 Sexta Fase. Georreferenciación de los sitios de manejo de residuos que proporcionarán los RSU al CP-FIRSU, así como de las plantas cementeras que serán los clientes potenciales para el consumo de las pacas FIRSU.

Se obtuvo *in situ* la ubicación de las plantas cementeras de CEMEX, Cementos Cruz Azul y Lafarge; así como de los sitios que operan en cada una de las poblaciones potenciales de suministro de RSU para el CP-FIRSU en el estado de Hidalgo. Principalmente los siguientes:

- ❖ Sitios de disposición final.
- ❖ Estaciones de transferencia.
- ❖ Centros de acopio.
- ❖ Plantas de separación.

Con el fin de obtener datos confiables para introducir y manipular en los sistemas de información geográfica.

4.7 Séptima Fase. Evaluación multicriterio y análisis fuente-destino para evaluar y determinar la ubicación factible del CP-FIRSU

Se empleó el software *ArcGis 10.2.2*, como una herramienta que ofrecen los sistemas de información geográfica, el cual permitió el procesamiento de datos espaciales cubriendo diversos temas y en diversas formas; por ejemplo, para evaluar el criterio ambiental se empleó información sobre cuerpos y corrientes de agua, con base en la normativa (NOM-083-SEMARNAT-2003) la cual establece distancias mínimas para emplazar infraestructura de manejo o disposición final de residuos. El procesamiento permitió sobreponer mapas y generar nueva información representada en mapas temáticos. Esto se favoreció debido al empleo de máquinas con mayor capacidad de procesamiento, mapas digitalizados, entre otra información geográfica disponible que permitió encontrar áreas que fueran técnica y ambientalmente factibles para la ubicación del CP-FIRSU. Es importante mencionar que la información analizada y generada mediante el software *ArcGis 10.2.2*, fue validada en campo.

Se realizó una evaluación multicriterio con el fin principal de evaluar alternativas para determinar las áreas factibles de localización del CP- FIRSU mediante dos aspectos fundamentales:

1. Asegurar que el sitio cumpla con consideraciones ambientales mínimas establecidas en la normativa, como el uso y tipo de suelo, agua y áreas naturales protegidas.
2. Asegurar que el sitio se integre en un programa general donde se tomen en cuenta los criterios técnicos y socioeconómicos para su evaluación.

Los criterios que se consideraron para alimentar los sistemas de información geográfica fueron:

- ❖ Geología: reconocer los tipos de suelo, así como su permeabilidad (Recursos Naturales, INEGI).
- ❖ Hidrología: red de cuerpos de agua incluyendo la presencia de acuíferos (Recursos Naturales, INEGI).
- ❖ Topografía: elevaciones sobre el nivel del agua, pendientes, fallas o fracturas etc., (Geografía, INEGI).
- ❖ Uso potencial del suelo: condiciones ambientales para aprovechar mejor el uso del suelo (Recursos Naturales, INEGI, RAN).
- ❖ Áreas Naturales Protegidas (CONANP).
- ❖ Socioeconómico: localización de centros urbanos (calles), población, fuente potenciales de manejo de residuos (rellenos, basureros, etc.) y el acceso a comercio e industria, así como la aceptación comunal y la factibilidad para la compra del terreno. (Cartografía, INEGI, RAN).
- ❖ Técnico y logístico: principalmente las vías de acceso-transporte, la procedencia de RSU considerando las distancias de las fuentes de manejo de residuos a las cementeras, carreteras, caminos y pendientes, sitios de acceso, análisis de costos considerando las características físicas del sitio entre otras (Mapas INEGI, información de la SCT, datos de otras fuentes como instituciones estatales o municipales, etc.).

Se realizó un análisis fuente-destino para optimizar las distancias y disminuir los costos del transporte del CP-FIRSU, el cual se dividió en dos etapas:

- 1) Calculando las distancias y costos de transporte de los sitios de manejo de RSU al CP-FIRSU.
- 2) Calculando las distancias y costos del transporte del CP-FIRSU a las plantas cementeras.

Se consideraron las áreas determinadas mediante la EMC con un nivel más favorable para ubicar y analizar 21 puntos preliminares para la ubicación óptima del CP-FIRSU.

El análisis incluyó la determinación de puntos óptimos de ubicación, considerando las distancias a los sitios de manejo y disposición final de residuos, también se consideraron la cercanía a las plantas cementeras y las vialidades existentes que su estado fuera transitable. Esto permitió realizar un análisis más detallado para instalar el CP-FIRSU con base a la optimización de los costos de transporte.

Por último, se realizó una evaluación de la aceptación social en cada uno de los puntos de ubicación óptima, mediante la aplicación de encuestas que permitieran conocer principalmente si los habitantes de las comunidades cercanas a los sitios óptimos de ubicación determinados aceptarían la instalación del CP-FIRSU, dándoles a conocer de manera preliminar los beneficios que se implementarían por su correcta ubicación y operación.

5. RESULTADOS

5.1 Normativa y estado del arte relacionados con la gestión de los RSU en Hidalgo

5.1.1 Normativa

La normativa ambiental de México regula la ubicación, construcción, operación y clausura de los sitios de disposición final de RSU y RME. A nivel estatal únicamente el Estado de México cuenta con una norma que contiene los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, selección y aprovechamiento de RSU. En el caso específico del estado de Hidalgo, no cuenta con legislación sólida que regule la instalación y operación de centros de procesamiento o plantas de selección de RSU.

En el presente trabajo se realizó una recopilación y análisis de la mayoría de las restricciones existentes en la normativa mexicana (Leyes, NOM, NMX, reglamentos y criterios) para construir infraestructura relacionada con la selección y procesamiento (valorización energética) de RSU, las cuales fueron denominados criterios ambientales normados.

Criterios ambientales normados, criterios técnicos y socioeconómicos

Entre las normas mexicanas que sirvieron de sustento para la ubicación del CP-FIRSU estuvieron las relacionadas con los sitios de disposición final (NOM-083-SEMARNAT-2003); el manual vinculado a las estaciones de transferencia (Sánchez *et al*, 1996); el manual de criterios para la ubicación, operación y cierre de infraestructura ambiental para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (SEMARNAT, 2010); con la norma técnica de requisitos y especificaciones para la instalación y operación de centros de acopio, transferencia, separación y tratamiento de los RSU y RME para el Estado de México, (NTEA-013-SMA-RS-2011); y por último pero no menos importante, se consideró la NADF-024-AMBT-2013 (SEDEMA, 2013) que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal para promover su aprovechamiento y la prevención de su generación.

NOM-083-SEMARNAT-2003

Esta norma regula la ubicación de los Sitios de Disposición Final (SDF) de los RSU y RME, así como su diseño, construcción, operación, clausura, monitoreo y obras complementarias; para que se lleven a cabo de acuerdo a los lineamientos técnicos que garanticen la protección al ambiente, la preservación del equilibrio ecológico y de los recursos naturales, la minimización de los efectos contaminantes provocados por la inadecuada disposición de los RSU y RME y la protección de la salud pública en el general.

Manual de estaciones de transferencia (ET) de residuos sólidos en áreas urbanas

Este manual reúne sugerencias técnico-operativas y atinadas recomendaciones ingenieriles; así como conceptos para la planeación para la toma de decisiones en la ubicación y operación de las ET, así como en el desarrollo de sitios encargados del manejo de residuos.

NTEA-013-SMA-RS-2011

Esta norma técnica estatal ambiental es de observancia obligatoria para todas las entidades públicas y privadas que instalen y operen infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en el Estado de México. Así mismo se puede tomar como base para aplicarla sus lineamientos a otras entidades de la República Mexicana.

Aplica para todos los establecimientos donde se lleven a cabo actividades relacionadas con el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

En el caso de instalaciones mixtas en las que se desarrollen dos o más operaciones de las señaladas en la presente norma, cada una de las áreas deberá observar lo establecido en los capítulos que le correspondan.

Manual Técnico de criterios para la ubicación, operación y cierre de infraestructura ambiental para el manejo de los RSU

En México existe infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, sin embargo la mayoría de los estados de la República no cuentan con un marco jurídico y técnico adecuado para regularla, por lo que dichas instalaciones se encuentran en su mayoría operando en condiciones inadecuadas, provocando riesgos a la salud y daños al ambiente.

Por lo anterior la SEMARNAT por medio de su dirección general de fomento ambiental, urbano y turístico determinó la necesidad de contar con un documento que contenga los criterios a considerar por las autoridades competentes y las empresas interesadas, para la ubicación y construcción de infraestructura asociada a la gestión integral de residuos como son centros de acopio, estaciones de transferencia, plantas de selección y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

La ubicación de un CP-FIRSU u otro tipo de infraestructura relacionada al manejo de los RSU en México y en el mundo, es una tarea extremadamente difícil de lograr, debido a que el proceso de selección depende de diversos factores tanto ambientales como sociales, además de los reglamentos.

En la Tabla 5.1 se detallan los criterios ambientales y técnicos que regula cada una de las normas o manuales.

Tabla 5.1 Criterios ambientales y técnicos que regulan las normas y manuales

Norma o Manual	Criterios que regulan	
	Ambientales	
NOM-083-SEMARNAT-2003	<p>No debe ubicarse en zonas de fracturas o fallas geológicas.</p> <p>No se debe ubicar dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANPs).</p> <p>La distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m. como mínimo.</p> <p>La ubicación entre el límite del sitio y cualquier pozo de extracción de agua no será menor de 500 m.</p> <p>Se debe ubicar en suelos con una mayor permeabilidad para evitar la infiltración de los lixiviados que se puedan generar.</p> <p>Cuando un sitio de disposición final se pretenda ubicar a una distancia menor de 13 km del centro de las pistas de un aeródromo de servicio público o aeropuerto, la distancia elegida se determinara mediante un estudio de riesgo aviario.</p>	
Norma o Manual	Técnicos	
NTEA-013-SMA-RS-2011	<p>Las plantas de separación podrán ubicarse en predios localizados fuera de la traza urbana y a una distancia mínima de 500 m de la población. Dentro de la traza urbana, sólo podrán ubicarse en zonas o parques industriales.</p>	
Manual Técnico SEMARNAT-2010	<p>Las plantas de separación o reciclaje que procesen residuos potencialmente reciclables, separados previamente en la fuente de origen, podrán ubicarse dentro de la zona urbana, en vialidades con ancho de 12 metros y pavimentos que resistan el paso de vehículos pesados.</p>	
NADF-024-AMBT-2013	<p>Establece que los residuos deben ser separados y clasificados desde la fuente generadora promoviendo su reducción y facilitando su reutilización, acopio, recolección selectiva y valorización para reincorporarlos en un proceso productivo.</p>	

Fuente: (Elaboración propia a partir de NOM-083-SEMARNAT-2003; NTEA-013-SMA-RS-2011; Manual Técnico SEMARNAT-2010; NADF-024-AMBT-2013)

5.1.2 Manejo de los residuos sólidos en el estado de Hidalgo

La problemática más común en Hidalgo en materia de residuos sólidos, es la generación e inadecuada separación de los mismos, la incipiente cultura ambiental, la resistencia social a la construcción de infraestructura de manejo de RSU, la insuficiente y los escasos recursos para la instalación de dicha infraestructura.

Hidalgo está conformado por 84 municipios con 4,596 localidades y con una población de 2,826, 650 habitantes (GIRESOL, 2012).

Se realizó una proyección del crecimiento de la población en las ciudades que conforman la megalópolis para el año 2045 (30 años), la población futura se determinó con base en los datos proporcionados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), se consideró utilizar el método aritmético debido a que los datos reportados por CONAPO presentan un crecimiento lineal de la población, lo cual significa que la población aumenta o disminuye en el mismo número de personas.

Se realizó la proyección de residuos, tomando como referente el incremento de la población y los datos obtenidos del Diagnóstico Básico de la Gestión Integral de Residuos (DBGIR), sin considerar un aumento en la tasa de generación de residuos. En la Tabla 5.2 se muestra la población actual y las proyecciones a futuro de la población, así como la generación de residuos en los estados que conforman la megalópolis en México.

Tabla 5.2 Proyecciones de población y generación de residuos en los estados de la megalópolis

Ciudades de la Megalópolis de México	Población (habitantes)		Generación de Residuos (t/año)	
	Año (2015)	Proyección (2045)	Año (2015)	Proyección (2045)
Estado de México	16,870,388	36,995,973	5,548,000	12,166,505
Morelos	1,920,350	4,203,106	766,500	1,677,653
Puebla	6,193,836	13,547,995	1,463,650	3,201,493
Distrito Federal	8,854,600	19,367,541	4,307,000	9,420,640
Tlaxcala	1,278,308	2,797,953	620,500	1,358,147
Hidalgo	2,826,650	6,296,709	876,000	1,916,334

Fuente: (Elaboración propia a partir de datos de población del CONAPO, 2010-2030; y generación de residuos del DBGIR, 2012)

De acuerdo a la proyección de residuos en 30 años (2015 a 2045) el crecimiento de la población, al igual que la generación de residuos va a incrementar en la mayor parte de los estados un promedio de 118%.

Servicios disponibles

De los 84 municipios de la entidad, 81 cuentan con los servicios de recolección y disposición final de residuos, al menos en la cabecera municipal; en dos de ellos, se da tratamiento por lo menos a una fracción de los RSU recolectados para facilitar su valoración y reducción de volumen: en los municipios de Huasca de Ocampo y Juárez Hidalgo. Los municipios que no cuentan con los servicios relacionados con los RSU son: Epazoyucan y Tepehuacán de Guerrero (INEGI, 2010).

Generación

De acuerdo con el diagnóstico básico del estado de Hidalgo, se estima una generación de 2,298 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, lo que representa una gpc de 0.862 kg/hab/día (GIRE SOL, 2012).

Recolección

En la entidad se recolectan en promedio 1,870 t/día de RSU generados en viviendas, parques, jardines y edificios públicos, principalmente, que representan 2% de la recolección a nivel nacional (INEGI, 2010).

En Hidalgo se tiene una cobertura de recolección del 75%, esto quiere decir que está siete puntos porcentuales por debajo de la media nacional (la cual es del 82%, según el Censo de Población y Vivienda 2010). La región con mayor porcentaje de recolección es la zona metropolitana de Pachuca (Pachuca, Mineral del Monte, Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca, Epazoyucan, Zapotlán, Zempoala) y Tizayuca considerado dentro de la zona metropolitana de la

ciudad de México (GIRE SOL, 2012). En la Tabla 5.3 se muestran las cantidades de los residuos recolectados en los municipios con mayor población.

Tabla 5.3 Municipios con mayor recolección de RSU y generación per cápita diaria

Municipio	Cantidad recolectada (kg/día)	Recolección per cápita diaria	Población (Habitantes)	Generación per cápita diaria	Generación de residuos (kg/día)
Pachuca de Soto	380,000	1.419	267,862	0.862	230,897
Tulancingo de Bravo	152,000	1.003	151,584	0.862	130,665
Tula de Allende	150,000	1.443	103,919	0.862	89,578
Tizayuca	120,000	1.231	97,461	0.862	84,011
Actopan	100,000	1.842	54,299	0.862	46,806
Mineral de Reforma	90,000	0.706	127,404	0.862	109,822

Fuente: (Elaboración propia a partir de INEGI, 2010)

En la gráfica 5.3 se puede observar que la recolección que la cantidad recolectada de residuos respecto a la que se genera en la mayoría de los municipios (excepto en Mineral de Reforma) es mayor tomando como base la generación per cápita que se reporta en el estado de Hidalgo (0.862 kg/hab/día). Esto nos permite suponer que los servicios de limpia, recolectan residuos que no solamente genera la propia población, si no otra empresas o industrias. La mayoría de dichos residuos no son putrefactibles, lo cual significa una oportunidad de aprovechamiento a través del reúso y reciclaje o como combustibles alternativos en los hornos cementeros.

Se puede observar que en la mayoría de los municipios de Hidalgo se reporta una recolección mayor de residuos con respecto a la población, sin embargo en Mineral de Reforma se tiene registrado que la cantidad de residuos recolectados no es mayor que la población del municipio. Esto permite analizar que es importante tomar medidas preventivas que permitan minimizar la generación de residuos en la mayor parte de los municipios de Hidalgo.

Características de la recolección

La separación de los residuos sólidos urbanos desde su origen es importante porque facilita la valorización y reúso de los materiales, disminuyendo el consumo y presión sobre los recursos naturales involucrados en su producción y alargando la vida útil de los sitios de disposición final, principalmente. Sin embargo, a nivel nacional solamente 11% de los residuos recolectados son separados o segregados desde la fuente generadora; mientras que en Hidalgo este porcentaje es de 8% (INEGI, 2010).

Vehículos utilizados en la recolección

A nivel nacional, se cuenta con 14,300 vehículos para la recolección de RSU; en Hidalgo se utilizan 410 vehículos para dicha tarea, que representan 3% de todas las unidades del país. Por tipo de vehículo, los de caja abierta se encuentran en primer lugar, contabilizado 222 unidades (54%), los de tipo compactador suman 176 (43%); mientras que 12 (3%) restante se clasifica en otro tipo de vehículos. Destacan Pachuca y Tizayuca por concentrar entre ambos, el 24% de todos los vehículos del estado.

En la Tabla 5.4 se muestran los municipios que concentran los vehículos recolectores de RSU, esta información es importante para analizar si la capacidad de la infraestructura con la que cuentan es suficiente para cubrir la recolección de los residuos en cada municipio del estado de Hidalgo (INEGI, 2010).

Tabla 5.4 Municipios que concentran los vehículos recolectores de RSU

Municipio	Número de vehículos Recolectores	Proporción respecto al total estatal (%)
Pachuca de Soto.	60	32
Tizayuca.	22	12
Tulancingo de Bravo.	15	8
Mineral de Reforma.	42	23
Tula de allende.	14	8
Ixmiquilpan.	12	6
Tepeji del Río.	10	5
Huejutla de Reyes.	10	5

Fuente: (Elaboración propia a partir de INEGI, 2010)

El promedio nacional de residuos recolectados por vehículo es de 6 t/día; mientras que en Hidalgo es menor, al transportar 4 t/día; la recolección en Tulancingo de Bravo y en Pachuca de Soto es el doble del promedio estatal, al registrar 8 t/día, en ambos municipios (INEGI, 2010).

De lo anterior se puede concluir que del total de residuos que se recolectan en Hidalgo (1,870 t/día), y de la capacidad de los vehículos recolectores con los que cuentan los municipios (1,640 t/día), no cubren en su totalidad los residuos que se recolectan por día en el estado, por lo que se recomienda aumentar 60 vehículos más para la recolección, para poder incrementar 240 toneladas de capacidad de los vehículos y que pueda ser correctamente cubierta la recolección.

Composición de los RSU en el estado de Hidalgo

El primer Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR) se realizó en el 2006 por la SEMARNAT. Para la integración de este diagnóstico, se recurrió a la información contenida en 21 Programas para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (PEPGIR) de entidades federativas (el 65.62% del total de 32 entidades con los que cuenta el país) y a información proveniente de los programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos de 34 municipios de la República Mexicana. En el país el 53% de los RSU son de tipo orgánico, en tanto que el 28% son potencialmente reciclables como el papel y cartón (14%), vidrio (6 %), plástico (4 %), hojalata (3 %) y textiles (1 %). El 19% restante son residuos de madera, cuero, hule, trapo y fibras diversas, los cuales son materiales potencialmente reciclables aunque con un mayor grado de dificultad (PEPGIR de Hidalgo, 2011).

La composición de residuos en el estado de Hidalgo se estima con 52% de materia orgánica y 48% de materia inorgánica, dicha proporción podrá variar en función del desarrollo económico regional y la densidad poblacional y status social (Sánchez, 2008).

Por otro lado un estudio elaborado por la consultoría ambiental TAAF en el año 2011, reporta otros datos referentes a la composición de los residuos en el estado de Hidalgo. En la Figura 5.1 se muestra la composición porcentual promedio de los residuos generados en el estado de Hidalgo.

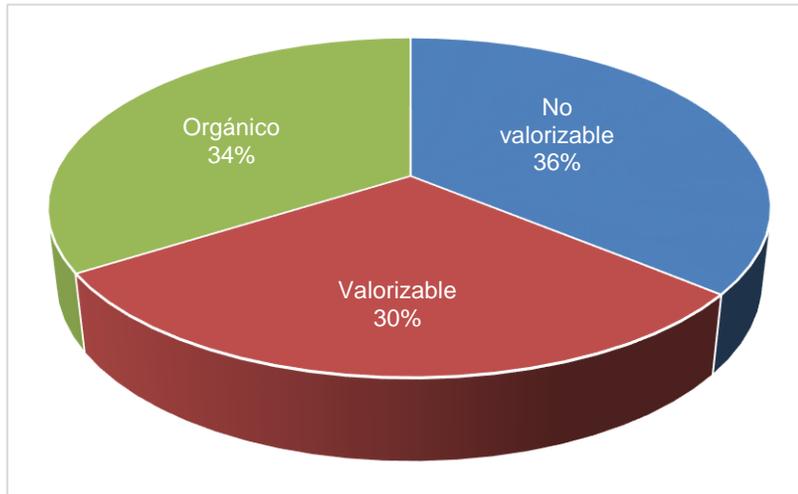


Figura 5.1 Composición de los RSU generados en Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de datos del PEPGIR de Hidalgo, 2011)

Dentro de la composición de RSU en Hidalgo el 34% de los son de tipo orgánico (residuos de alimentos y jardinería), 30% residuos valorizables (residuos de cartón, tetra-pack, lata, papel, plástico, vidrio, PET, PEAD, entre otros) y el 36% son residuos no valorizables (pañales desechables, papel sanitario, unicel, trapo y pedacerías de materiales diversos como plásticos, hules, papel, cartón y textiles). En la Figura 5.2 se muestran ejemplos de estos residuos.



Figura 5.2 Diferentes tipos de RSU generados en los municipios de Hidalgo
Fuente: (Adaptado de PEPGIR de Hidalgo, 2011)

Residuos de Manejo Especial (RME)

Dada la gran variedad de residuos generados por las industrias en nuestro país, se desconoce con precisión la composición de los RME a nivel nacional, ya que esta depende de las actividades que realice cada empresa.

No se sabe a ciencia cierta cuál es la composición general de todos los RME que se generan a nivel estatal; sin embargo, se cuenta con la información reportada en las cédulas de operación anual de 350 empresas manufactureras que operan dentro de Hidalgo. Con base en ésta información se obtuvo la composición porcentual de los RME de este ramo, los cuales se presentan en la Figura 5.3.

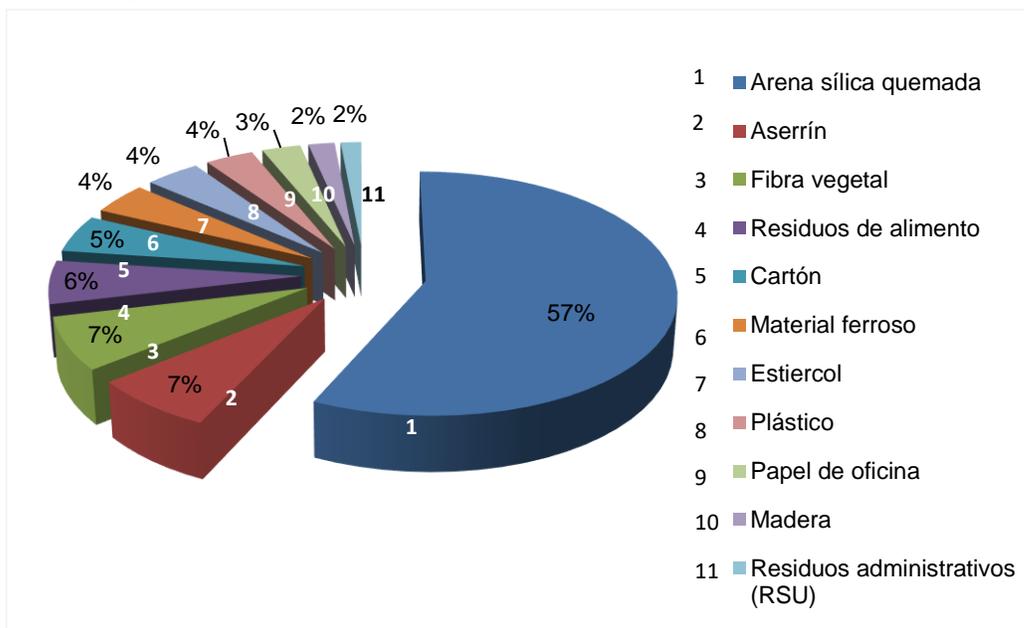


Figura 5.3 Composición porcentual de los RME provenientes de 350 empresas manufactureras
Fuente: (Elaboración propia a partir de datos del PEPGIR de Hidalgo, 2011)

Se puede observar que el porcentaje que corresponde a los desechos de arena sílica quemada, es el más alto con el 57.7% del total reportado, estos residuos son generados por una empresa ubicada dentro del corredor Industrial de Cd. Sahagún, en el Municipio de Tepeapulco, la cual se dedica a la fundición de hierro primario.

El siguiente porcentaje más representativo en la composición de los RME es el aserrín, con el 7.2%, el cual proviene de fábricas de muebles principalmente, este tiene la ventaja que puede ser reutilizado como combustible en otros procesos, como actualmente lo están haciendo en la Región VII del Estado, donde el aserrín es empleado como combustible alternativo en los hornos ladrilleros. El tercer porcentaje más representativo dentro de la composición, es el de la fibra vegetal, la cual está compuesta por materiales como yute, cepillado de pacas de algodón y borra, entre otras (PEPGIR de Hidalgo, 2011).

En el apartado de marco teórico se detallaron los datos obtenidos de los diferentes tipos de residuos con alto poder calorífico, que pueden ser utilizados como combustibles alternos en las plantas cementeras o en cualquier otra industria, en la Tabla 5.5 se muestra una comparativa de los valores más representativos de poder calorífico, tanto de los combustibles fósiles de uso común como de los residuos más representativos según se recolectan en Hidalgo.

Tabla 5.5 Poder calorífico de los RSU según se recolectan respecto a combustibles fósiles

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)	Residuos según se recogen	Poder calorífico (MJ/kg)
Coque	33.488	Plásticos mezclados	32.70
Gas natural	48	Cartón	26.20
Combustóleo	44	Textiles	18.30
Hulla	29	Papel mezclado	15.70
Lignito	20	RSU	10.70

Fuente: (Elaboración propia a partir de Rojas-Valencia y Marín, 2014)

El contenido energético de los RSU depende de la mezcla de materiales que contengan, así como su contenido en humedad. El test estándar utilizado para determinar el calor de combustión de un material implica la quema completa de una muestra en una bomba calorimétrica y medir el aumento de la temperatura del agua circundante.

El resultado obtenido se conoce como el calor de combustión bruto (HHV) o mejor conocido como poder calorífico bruto (PCB). La energía utilizada para vaporizar la humedad se halla incluida en el PCB, la cual generalmente no se recupera durante una combustión normal a menos que las emanaciones se condensen.

La composición de los RSU varía considerablemente en función de la localización de su recolección en el mundo, y por lo tanto, también su contenido energético. En los países en vías de desarrollo, la fracción de los residuos que consiste en materiales fabricados, como el papel, los metales, plásticos y vidrio, es relativamente pequeña, lo que significa que el porcentaje de restos de comida es alto, generalmente por encima del 40%. Puesto que los desperdicios de alimentos tienen una densidad energética baja, el poder calorífico de los RSU en los países en vías de desarrollo tiende a ser menor que el de los países más industrializados. Khan y Abu-Gharrarah (1991) desarrollaron una ecuación (5.1), que calcula el PCB de los RSU basándose en las fracciones de papel y de comida, más un término que engloba el plástico, el cuero y la goma (Masters *et al.*, 2008).

$$PCB (kJ/kg) = 53.5 (F + 3.6 CP) + 372 PCG \dots \dots \dots (5.1)$$

Donde F es la comida, CP es el cartón y el papel y PCG representa los plásticos, el cuero y la goma en la mezcla del residuo, todo expresado como porcentajes de masa. México cuenta con un 53% de residuos de comida, un 28% de papel y un 19% de plásticos, cuero y goma, mediante la ecuación (1) calcularía el valor del PCB de los RSU en:

$$PCB (kJ/kg) = 53.5 [(53 + (3.6 * 28))] + (372 * 19) = 15,296 kJ/kg \cong 15.30 MJ/kg$$

5.2 Cuantificación del poder calorífico de la FIRSU

En el capítulo 3 se presentó el estudio documental para determinar cuáles son los residuos con alto poder calorífico que pudieran ser empleados como combustibles alternativos en los hornos cementeros, estos residuos finalmente se tienen que procesar para obtener las pacas FIRSU, las cuales poseen un poder calorífico variable debido a los diferentes residuos que puede contener cada paca.

Se tomaron cinco muestras de las pacas FIRSU mediante el método de cuarteo, en los meses de julio y septiembre del año 2015. Se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Resultados del análisis del poder calorífico a muestras de pacas FIRSU que llegan a las planta cementera de CEMEX en Huichapan, Hidalgo

Fecha	PC (cal/g)	PC (MJ/kg)
03-Jul-15	4,300	18.00
06-Jul-15	4,104	17.18
10-Jul-15	4,316	18.07
18-Sep-15	4,850	20.31
21-Sep-15	4,232	17.72

Fuente: (Elaboración propia)

El promedio de los valores durante los dos meses resultó ser de 18.26 MJ/kg.

5.3 Plantas cementeras y sitios de manejo de RSU en el estado de Hidalgo

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.

En México, 32 plantas cementeras, de las 34 que operan en el país, emplean en el coprocesamiento, residuos como combustibles alternativos (véase Figura 5.4). Las empresas instaladas en México, en todos los casos reportan una capacidad en toneladas de 30% de sustitución de combustible alternativo y lo que emplean para su proceso son los residuos peligrosos como: resinas, aceite gastado, mezcla de solventes y aceites, sólidos impregnados (textiles, estopa y envases), carbón activado proveniente de las plantas de tratamiento de agua residual, grasas lubricantes, hule y plástico impregnado de residuos peligrosos y residuos contaminados con pintura, residuos biológico infecciosos (jeringas esterilizadas), aceite gastado y material impregnado de aceite o grasa, lubricantes usados, materiales sólidos textiles como son: estopas, trapos, mantas, guantes, overoles, franelas impregnados con aceite lubricante usado, grasas y/o solventes no clorados y residuos plásticos de la industria automotriz como NFU, entre otros residuos con características similares (CANACEM, 2006).



Figura 5.4 Empresas cementeras que emplean el coprocesamiento en México
Fuente: (Adaptado de CANACEM, 2014)

5.3.1 Plantas cementeras en el estado de Hidalgo

La entidad Hidalguense capta más del 10% de los puestos de trabajo en las plantas cementeras. La industria cementera de Hidalgo produce aproximadamente 9.60 millones de toneladas de cemento, lo cual representa el 24% de la producción anual. Con las 6 plantas que posee en su territorio, cuenta con el 18% del total que operan en el país (CANACEM, 2014).

En la Figura 5.5 se muestra la localización de las plantas cementeras en el estado de Hidalgo que serían los clientes potenciales para el consumo de la FIRSU, las cuales son CEMEX, Cementos Cruz Azul y LAFARGE.



Figura 5.5 Localización de las plantas cementeras en Hidalgo
Fuente: (Adaptado de CANACEM, 2014)

Un cálculo directo de los valores de producción relacionados con una planta específica para producir cemento ofrece una idea aproximada del uso del coprocesamiento. Tomando como ejemplo un reemplazo de 15% de combustible fósil (coque de petróleo) por residuo, se tendrá una disminución en la energía demandada en los hornos de producción, en la Tabla 5.7 se muestran una evaluación de los ahorros generados (Queiroz *et al.*, 2013).

Tabla 5.7 Evaluación de los ahorros generados por la sustitución de 15% de combustible por residuos

Descripción	Unidad	Valor
Producción anual de cemento	t/año	1,500,000
Total de días de trabajo del horno	Días/año	330
Producción diaria del Clinker	t/día	4,545
Consumo de energía/kg de Clinker	kcal	800
Energía diaria demandada	109 kcal/día	3.6
Valor calorífico mínimo de coque de petróleo	kcal/kg	8,200
Cantidad de combustible diario	t/día	443,459
Ahorro de combustible diario con la sustitución de coque por residuo (15%)	t/día	70.29
Costo de coque de petróleo	Dólares/tonelada	61
Ahorro diario con combustible	Dólares/día	4,287.69
Ahorro anual con combustible	Dólares/año	1,414,938

Fuente: (Elaboración propia a partir de Queiroz *et al.*, 2013)

CEMEX Planta Atotonilco, Hidalgo

La planta de Atotonilco se localiza en el Barrio de Boxfi s/n, Colonia Tolteca (véase Figura 5.6). Actualmente está en operación, cuenta con una capacidad de aproximada de un millón de toneladas al año, realiza el coprocesamiento de residuos con un 30% de sustitución de combustible alterno. Los cementos fabricados en esta instalación permiten satisfacer mejor los requerimientos de cualquier tipo de proyecto de construcción, además de que son producidos cuidando el medio ambiente, ya que la planta cuenta con un sistema que garantiza el uso más eficiente del agua en sus procesos (SEMARNAT, 2014).



Figura 5.6 CEMEX planta Atotonilco, Hidalgo

Fuente: (Elaboración propia)

CEMEX Planta Huichapan, Hidalgo

La planta Huichapan se localiza en el Rancho la Sala, Ejido el Maney (véase figura 5.7), realiza el coprocesamiento de residuos con un 30% de sustitución de combustible alternativo (SEMARNAT 2014).



Figura 5.7 CEMEX planta Huichapan, Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia)

Cementos Fortaleza, Planta El Palmar

En el mes de Julio del 2014 la firma mexicana Elementia inauguró la planta de cementos Fortaleza "El Palmar", en el Municipio Santiago de Anaya, Hidalgo (véase Figura 5.8). Esta planta es una de las más modernas de América Latina con una capacidad instalada de dos millones de toneladas al año.



Figura 5.8 Cementos Fortaleza Planta El Palmar
Fuente: (Elaboración propia)

Cementos Fortaleza, Planta Vito

Esta planta se localiza en la Avenida 1° de Mayo # 1, Col. Centro Vito, en el Municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo (véase Figura 5.9).



Figura 5.9 Cementos Fortaleza Planta Vito
Fuente: (Elaboración propia)

Cementos Fortaleza, Planta Tula

Se localiza en Casco del Rancho Bateje 2 km. Al este del km. 5 de la carretera Atitalaquia-Apaxco. El Refugio, Atotonilco de Tula, Hidalgo (véase Figura 5.10).



Figura 5.10 Cementos Fortaleza Planta Tula
Fuente: (Elaboración propia)

Cementos CYCNA, CRUZ AZUL

Se localiza en Carretera Tula – Tepeji del Río, km 6, Cd., en la Cooperativa Cruz Azul Tula de Allende, Hidalgo. Actualmente produce más de tres millones de toneladas por año y cuenta con más de 530 socios activos (véase Figura 5.11).



Figura 5.11 Cementos Cruz Azul Planta Tula de Allende
Fuente: (Elaboración propia)

5.3.2 Sitios de manejo integral de RSU en el estado de Hidalgo

Estaciones de Transferencia (ET)

El estado de Hidalgo no cuenta con ninguna ET en su territorio que permita optimizar las rutas de recolección de residuos para su disposición final o tratamiento.

Centros de acopio

Los centros de acopio son instalaciones operadas para recibir temporalmente materiales susceptibles de ser valorizados.

En la entidad ocho municipios cuentan con 14 centros de acopio; los materiales que se reciben principalmente son chatarras y metal en general, aceite gastado, papel, cartón, y PET (INEGI, 2010). En la Tabla 5.8 se detallan los centros de acopio, su ubicación y los materiales que reciben según el giro.

Tabla 5.8 Centros de acopio que operan actualmente en el estado de Hidalgo

Centro de acopio	Ubicación	Materiales que recibe
Recuperados y Reciclados.	Carretera Jorobas Tula, km. 22.5, No. B Progreso Tula.	Aceites gastados.
Proambiente, S.A. de C.V. (Planta Huichapan).	Ejido el Maney, Huichapan.	Aceite usado.
Grupo cuatro.	Parque industrial, Pachuca.	Chatarra de fierro y metales no ferrosos.
Reciclados de Hidalgo.	Arnulfo R. Gómez 39, Col. Adolfo López Mateos, Pachuca.	Chatarra y metales en general.
Cometiza.	Av. Juárez Norte s/n, Tizayuca.	Acero inoxidable, cobre aluminio, bronce, etc.
Herin/Brocar.	Av. Leona Vicario 12, Col. Santiago Tezontlale, Ajacuba.	Metales, chatarra y desperdicios industriales no peligrosos.
Chatarra Espejel.	Av. Juárez Sur 26, Tizayuca.	Chatarra y metales no ferrosos.
Lingotiza, S.A. de C.V.	Oriente Lote 5, Manzana 21, Fraccionamiento Industrial, Tizayuca.	Metales.
Planta de reciclaje de los desechos plásticos.	Camino de la Cruz 24, San Juan Tepemazalco, Hidalgo.	Plásticos.
ECOCE.	Moliere 39 segundo piso Polanco, Ciudad de México, servicio en Pachuca.	Botellas de PET.

Fuente: (Elaboración propia a partir de SEMARNAT, 2010)

El porcentaje de recuperación y reciclaje de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en el estado de Hidalgo es en promedio de 2.40%, gran parte de éstos se obtienen mediante el empleo informal, es decir la pre-pepena (durante la recolección y pepena en el sitio de disposición final). La región con mayor porcentaje de recuperación y reciclaje de residuos es la zona metropolitana de Pachuca (Pachuca, Mineral del Monte, Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca, Epazoyucan, Zapotlán, Zempoala) y Tizayuca considerado dentro de la zona metropolitana de la Ciudad de México (GIRE SOL, 2012).

Plantas de composta

En México existen 60 plantas de compostaje instaladas, de las cuales aproximadamente 17 se encuentran inactivas debido a diversas razones. Las más grandes y exitosas se encuentran en la Ciudad de México y el Estado de México, por su parte Hidalgo nunca ha contado con una planta de compostaje (privada o pública), en toda su historia (INECC-SEMARNAT, 2012).

Plantas de separación de residuos sólidos

El estado de Hidalgo carece de plantas de separación de residuos, lo cual fue cierto hasta el 2013, año en que se inauguró la primera planta de separación de residuos sólidos (véase Figura 5.12), la cual se encuentra ubicada en la comunidad de San Juan Tilcuautla, municipio de San Agustín Tlaxiaca.

La planta de separación es operada por la empresa “Cambio Verde”, su implementación genera alrededor de 200 empleos directos y otro tanto de indirectos; cuenta con una infraestructura para procesar 400 toneladas diarias de residuos y tuvo una inversión de 80 millones de pesos. Esta planta permite recuperar un alto porcentaje de materiales reciclables, por lo que se disminuye considerablemente el volumen de residuos que se tiran, lo cual permite alargar la vida de los rellenos sanitarios (INEGI, 2010).

Otra de las ventajas de esta planta, es la creación de conciencia ambiental en la población, ya que fomenta recorridos escolares, para explicar a los niños el proceso de separación y la importancia del cuidado del ambiente.

En la actualidad se han presentado diversos problemas de tipo operativo en los equipos, lo que ocasionó que no esté en operación, hasta que se solucionen.



Figura 5.12 Planta de separación de residuos “Cambio Verde”
Fuente: (Elaboración propia)

Sitios de Disposición Final

Como se muestra en la Figura 5.13, a nivel estatal se encuentran en operación 65 sitios de disposición final, de los cuales el 64% son tiraderos a cielo abierto, 20% son rellenos sanitarios municipales, 6% son rellenos sanitarios regionales, 5% son rellenos sanitarios regionales sin operación y el 5% son sitios controlados (SEMARNATH, 2015)

Muy pocos de los sitios de disposición final que se encuentra en operación en el estado, cumple con las condiciones de operación y construcción establecidas en la NOM-083- SEMARNAT-2003.

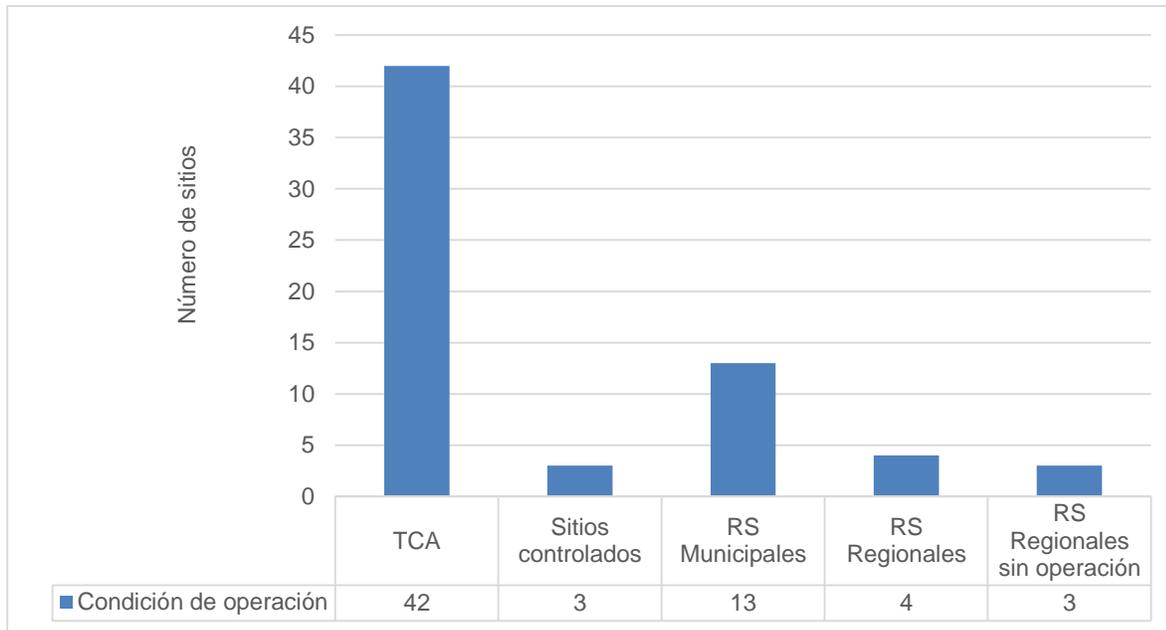


Figura 5.13 Infraestructura sanitaria para la disposición final de residuos en Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de datos de SEMARNATH, 2015)

En las Figuras 5.14 y 5.15 se muestran los rellenos sanitarios municipales y regionales que reciben una mayor cantidad de residuos. En el apartado de anexos, en las Tablas A.1 y A.2 se especifican las características más importantes de los sitios de disposición final.

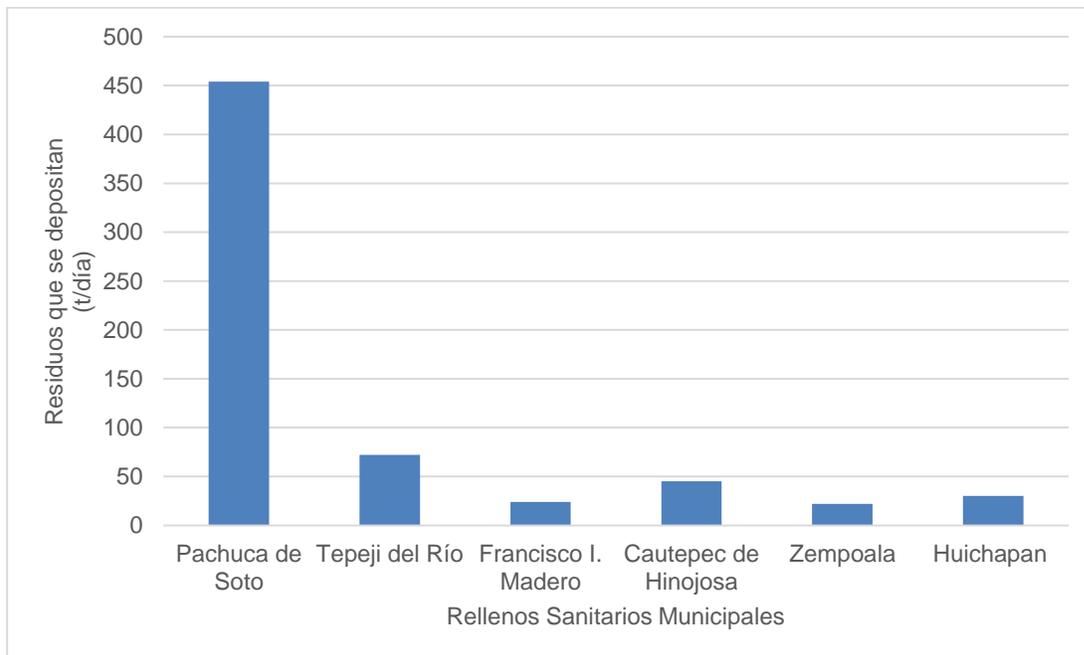


Figura 5.14 Cantidad de residuos que reciben diariamente los rellenos sanitarios municipales
Fuente: (Elaboración propia a partir de datos de la SEMARNATH, 2015)

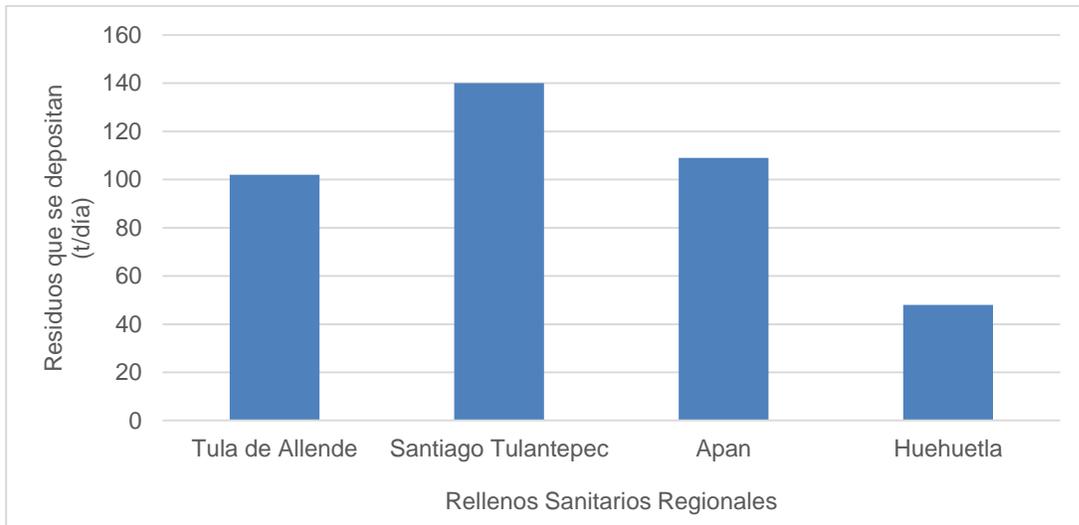


Figura 5.15 Cantidad de residuos que reciben diariamente los rellenos sanitarios regionales
Fuente: (Elaboración propia a partir de datos de la SEMARNATH, 2015)

En la Figura 5.16 se muestran los rellenos sanitarios municipales de Pachuca (a) y Zempoala (b). El de Pachuca es el que mayor cantidad de residuos recibe al día.



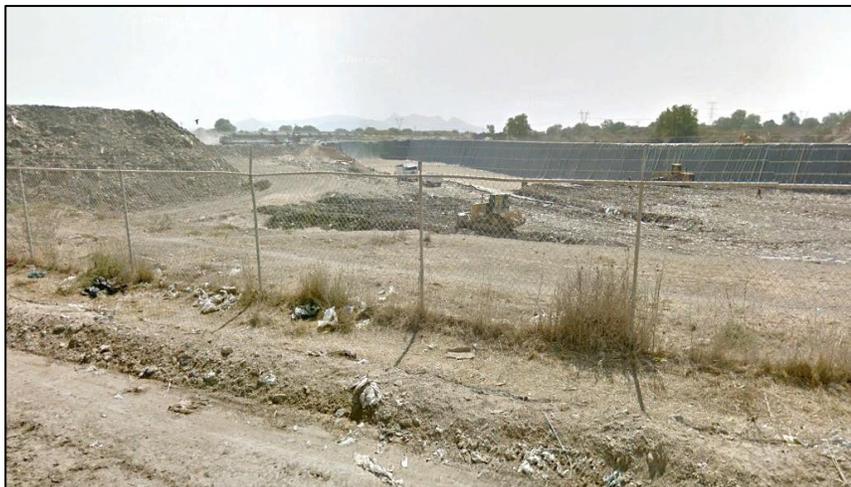
a)



b)

Figura 5.16 Rellenos sanitarios municipales de Pachuca (a) y Zempoala (b)
Fuente: (Elaboración propia)

En la Figura 5.17 se muestran los rellenos sanitarios regionales de Tula de Allende y Metepec. El de Metepec no se encuentra en operación, el de Tula es junto con el de Santiago Tulantepec los de mayor número de residuos depositados por día.



a)



b)

Figura 5.17 Rellenos sanitarios regionales de Tula de allende (a) y Metepec (b)

En la Figura 5.18 se muestra la localización y distribución de la infraestructura de operación para la gestión de los RSU con la que cuenta el estado de Hidalgo.

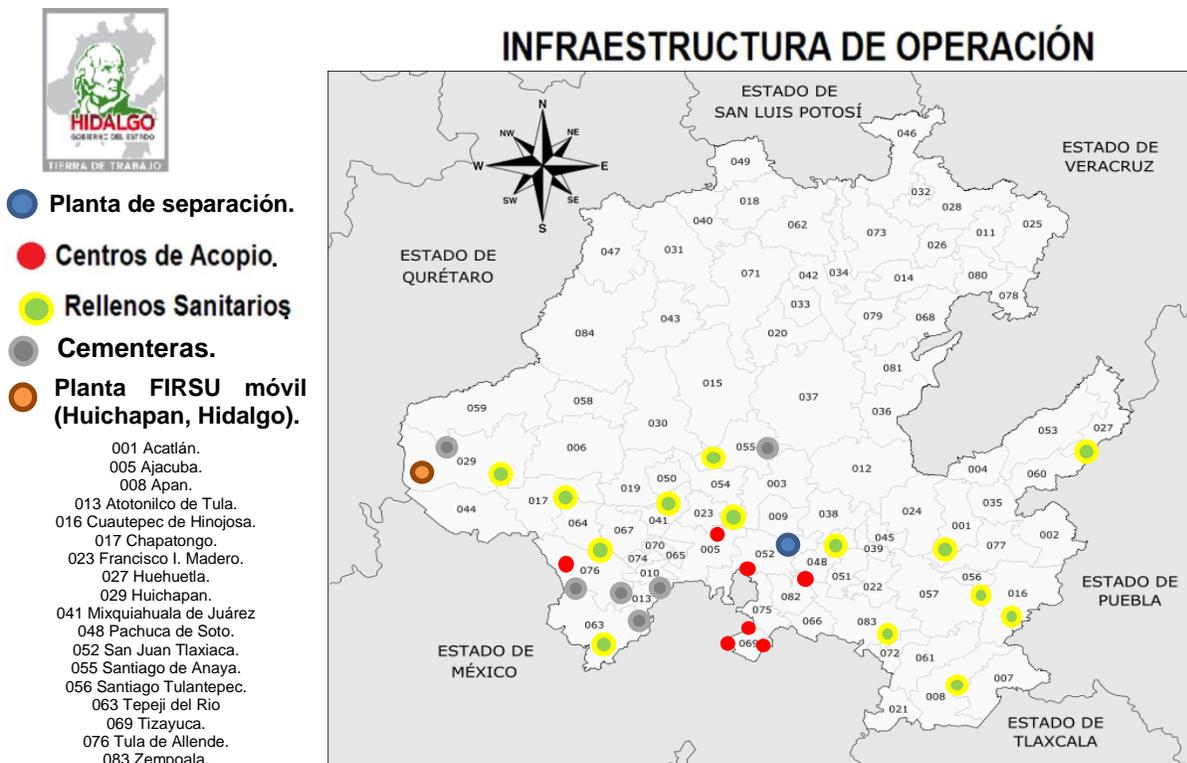


Figura 5.18 Infraestructura para la operación y el manejo de los RSU en el estado de Hidalgo

Se puede observar que la mayoría de los sitios de manejo de residuos y las plantas cementeras que operan en Hidalgo se encuentran en la parte suroeste del estado, este es fue un criterio que se consideró para delimitar el área de estudio y proponer la ubicación óptima del CP-FIRSU.

5.4 Coordenadas geográficas de las plantas cementeras y sitios de manejo de RSU

En la Tabla 5.9 se muestran las coordenadas de ubicación de las plantas cementeras que operan actualmente en el estado de Hidalgo.

Tabla 5.9 Coordenadas UTM de las plantas cementeras

ID	UTM		Nombre
	x	y	
1	497603	2257504	PFS Planta Fortaleza Santiago de Anaya
2	428451	2253861	PCH Planta CEMEX Huichapan
3	465873	2210292	PCA Planta Cruz Azul
4	477602	2211536	PCAT Planta CMEX Atotonilco
5	479498	2210562	Planta Fortaleza Vito
6	481000	2212698	Planta Fortaleza Tula

Fuente: (Elaboración propia)

En la Tabla 5.10 se muestran las coordenadas de ubicación de los rellenos sanitarios municipales y la planta de selección Cambio Verde.

Tabla 5.10 Coordenadas UTM de rellenos sanitarios municipales y la planta de selección Cambio Verde

ID	UTM		Nombre
	x	y	
1	518846.68	2218269.34	RS Pachuca
2	521879.47	2201584.99	RS V de Tezontepec
3	467073.68	2197949.6	RS Tepeji del Rio
4	490235.33	2241568.43	RS Francisco I. Madero
5	438147	2263277	RS Tecozautla
6	472001.83	2251269.13	RS Chilcuautila
7	574110.3	2211776.99	RS Cuauhtepic de Hinojosa
8	529945.11	2202725.01	RS Zempoala
9	539888.37	2190049.09	RS Tlanalapa
10	470396.96	2265805.5	RS Tasquillo
11	547960.94	2235616.56	RS Huasca de Ocampo
12	14431885.36	2249949.12	RS Huichapan
13	520060	2228414	PS Cambio Verde

Fuente: (Elaboración propia)

En la Tabla 5.11 se muestran las coordenadas de ubicación de los rellenos sanitarios regionales.

Tabla 5.11 Coordenadas UTM de rellenos sanitarios regionales

ID	UTM		Nombre
	x	y	
1	472810	2218261	RSR Tula de Allende
2	561731	2243706	RSR Metepec
3	558036.85	2216419.5	RSR San Tulantepec
4	555828.07	186349.06	RSR Apan
5	456624.59	2248158.36	RSR Chapatongo
6	484938	2242943	RSR Mixquiahuala
7	586637.77	2256803.37	RSR Huehuetla

Fuente: (Elaboración propia)

5.5 Proyección de la población y residuos en los municipios del área de estudio

En la Figura 5.19 se muestran los municipios del estado de Hidalgo que generan la mayor cantidad de residuos. A través de un gradiente señalado en color rojo se indica que la cantidad de residuos va aumentando.

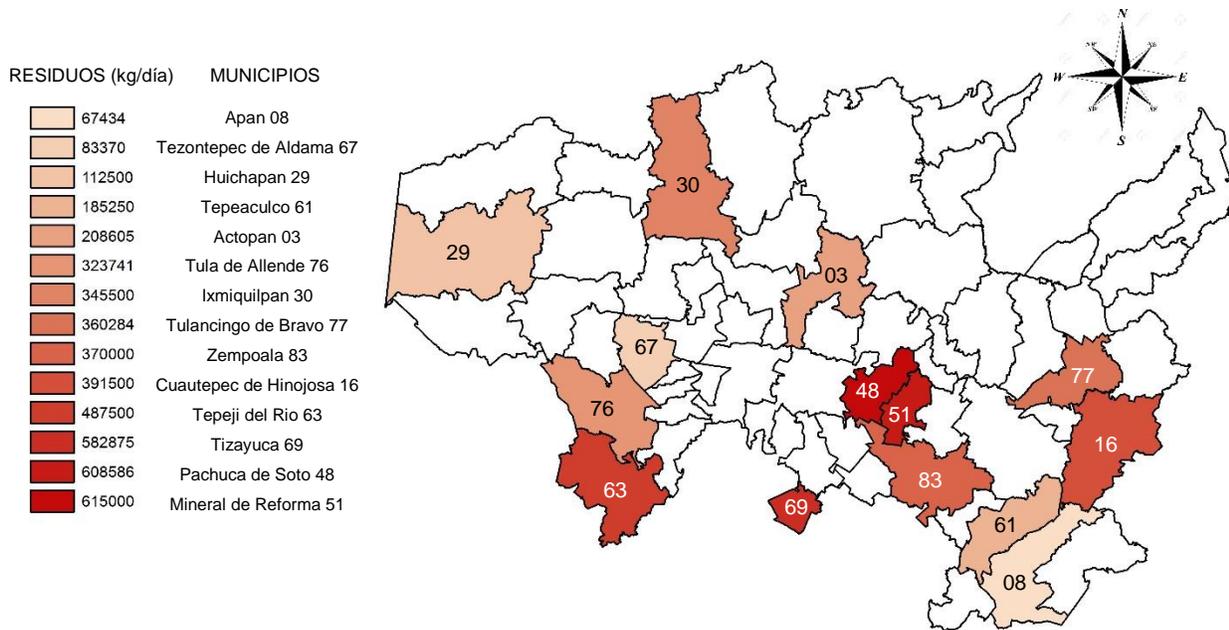


Figura 5.19 Municipios con mayor generación de residuos para el año 2045
Fuente: (Elaboración propia a partir de INEGI, 2015)

En la Figura 5.20 se muestra la proyección del crecimiento de la población mediante el método aritmético, en los municipios con un número mayor a 45,000 de habitantes. Los municipios con mayor población en el futuro serán Mineral de Reforma y Pachuca.

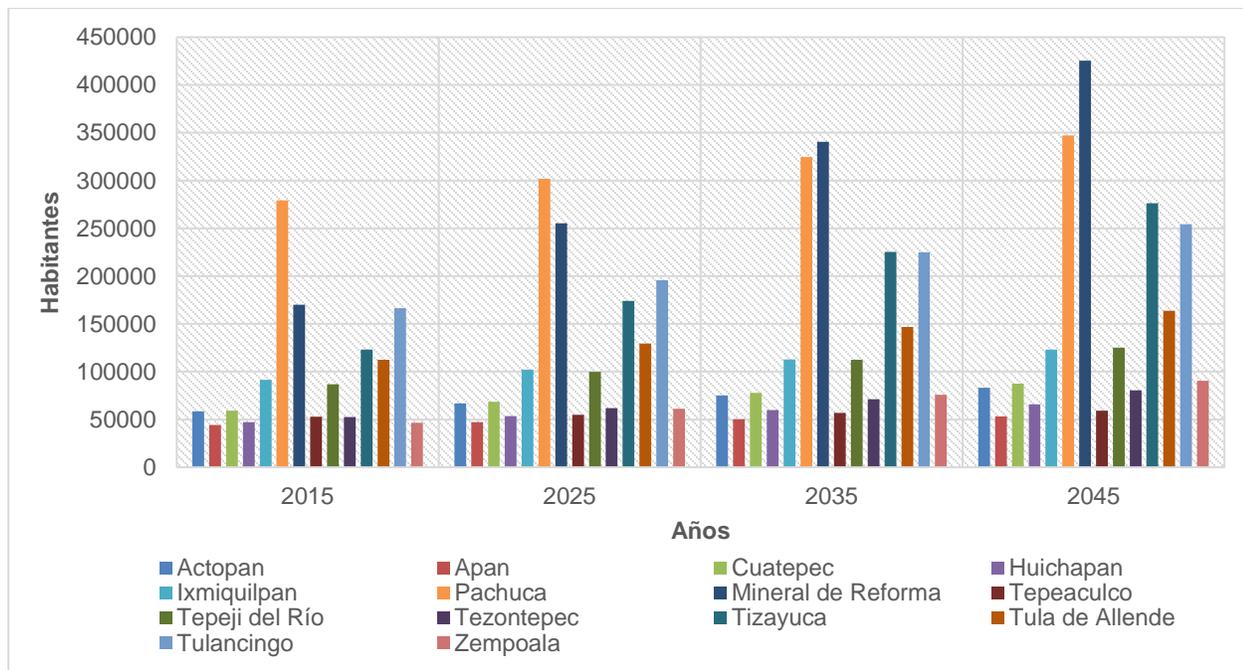


Figura 5.20 Proyección a 10, 20 y 30 años de la población en municipios de Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de CONAPO, 2010-2030)

En la Figura 5.21 se muestra la proyección del crecimiento en la generación de residuos mediante el método aritmético, en los municipios con un número mayor a 45,000 habitantes. Los municipios con mayor generación de residuos serán Mineral de Reforma y Pachuca.

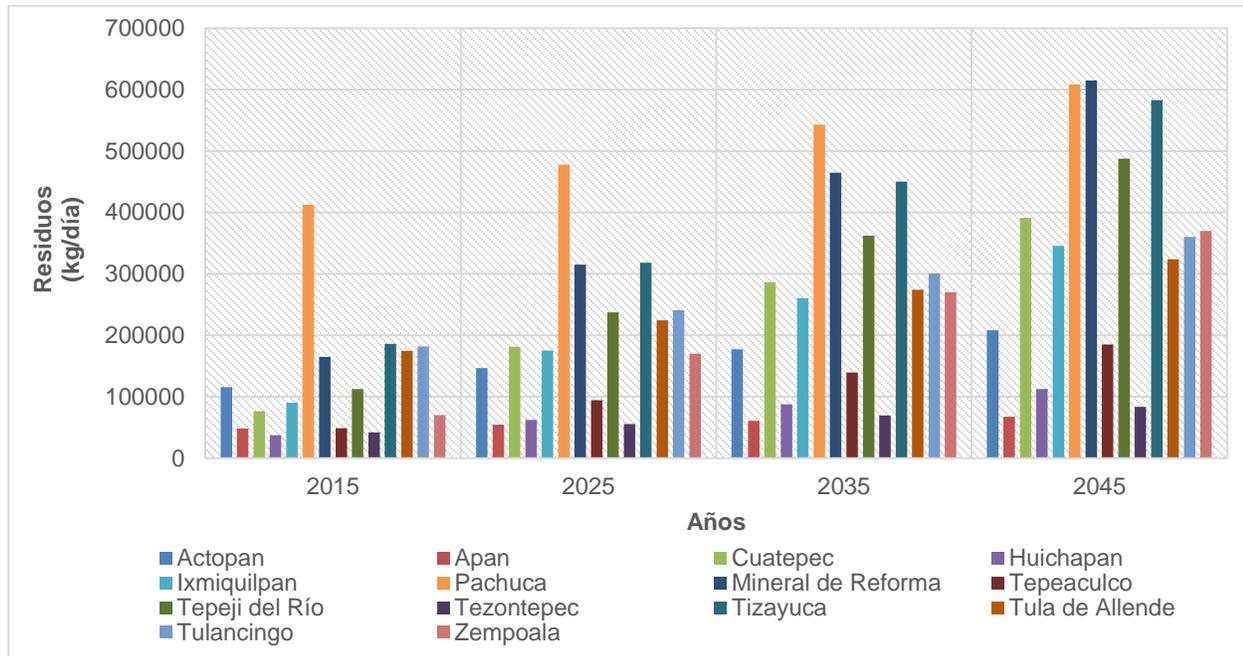


Figura 5.21 Proyección a 10, 20 y 30 años de la generación de residuos en municipios de Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de INEGI, 2015)

Para la proyección de los residuos y la población, se tomó como base el método aritmético, debido a que los resultados presentan una tendencia de crecimiento lineal, similar a las estimaciones de los datos de población obtenidos de CONAPO y los datos de residuos del banco de información del INEGI.

Algunas de las principales empresas especialistas en el desarrollo de proyectos para implementar infraestructura en el manejo y aprovechamiento de RSU a nivel nacional (Grupo Transforma Ambiental y Promotora Ambiental) e internacional (MASIAS Recycling), en la mayoría de sus estudios de factibilidad tecnológica y proyectos ejecutivos han implementado como base un periodo de diseño de 20 años, con la finalidad de asegurar la capacidad de recepción de los residuos que lleguen a las plantas.

La capacidad del CP-FIRSU a los 20 años, con base en la proyección y composición (48% materia inorgánica) de los residuos que se generan en los municipios de Hidalgo es de 1799 t/día.

5.6 Análisis de la infraestructura que se requiere en un CP- FIRSU fijo en Hidalgo

Para llevar a cabo el correcto funcionamiento de un CP-FIRSU es necesario instalar equipos de proceso para realizar y mejorar la eficiencia de operaciones unitarias en sistemas de manejo de residuos sólidos, recuperar recursos (materiales reciclables) y recuperar productos de conversión y energía (pacas FIRSU). El propósito de este capítulo es describir las operaciones básicas y los equipos que pueden ser utilizados en un centro de procesamiento FIRSU.

Debido a que muchos de los equipos, especialmente aquellos asociados con la recuperación de materiales y energía, están en un estado de cambio continuo con respecto a los criterios de diseño. Se presenta información de ingeniería, también se mencionan, los factores que deben ser considerados en la selección de equipo, tanto técnicos y económicos. Sin embargo, es muy importante tener en cuenta los registros de instalaciones en operación, análisis y visitas de campo, y fichas técnicas de empresas fabricantes de los equipos. En diversas comunidades del estado de Hidalgo se recogen productos reciclables sin separar y residuos sin aprovechar. Tales residuos pueden ser directamente depositados en un relleno sanitario pero contienen valiosos recursos que podrían recuperarse. Y no solo pueden extraerse los materiales reciclables directos, también los residuos pueden procesarse para obtener las pacas FIRSU, como es el caso de la planta empacadora que se localiza en la delegación de Iztapalapa (véase Figura 5.22), en la cual se separan y procesan los residuos con potencial calorífico y se emplean como combustibles alternativos para obtener energía calorífica en los hornos cementeros a través de su coprocesamiento, para poder incrementar la vida útil de los sitios de disposición final y disminuir el uso de combustibles fósiles no renovables.



Figura 5.22 Planta empacadora de Iztapalapa
Fuente: (Elaboración propia)

Las instalaciones de procesamiento de la FIRSU utilizan una combinación de maquinaria pesada para cribar, triturar, separar, clasificar, compactar y empacar los residuos. En la Figura 5.23 se muestra un diagrama básico del funcionamiento de un sistema de procesamiento FIRSU.

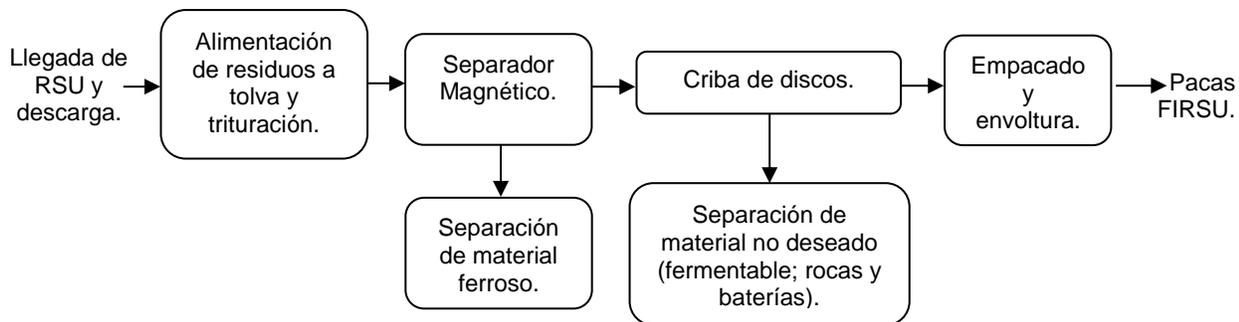


Figura 5.23 Diagrama de proceso básico de las pacas FIRSU para el aprovechamiento energético de los RSU

Fuente: (Elaboración propia)

Los diferentes tipos de equipos que pueden ser incluidos en un centro de procesamiento para generar las pacas FIRSU son presentados en la Tabla 5.12. Los equipos utilizados en este tipo de instalaciones son variables, y la selección está basada conforme al número de residuos mezclados que serán separados, su humedad, poder calorífico, las características originales del residuo, consideraciones de espacio y capacidad de producción de la instalación, así como de los recursos económicos con los que se cuentan.

Las líneas de producción de combustibles alternativos, sea cual fuese el residuo por valorizar, consisten básicamente en la separación de los elementos con más alto poder calorífico, en su trituración para alcanzar una granulometría final que se adecue a los requerimientos finales para su eficiente coprocesamiento, así como su compactación y empacado para una mayor facilidad en su transporte.

Se trata de valorizar al máximo los residuos que ya no se puedan reusar o reciclar, produciendo combustibles para distintos procesos térmicos, reduciendo la cantidad de los que se envían a disposición final en rellenos sanitarios y tiraderos.

Tabla 5.12 Procesos y equipos utilizados para el procesamiento de combustibles alternos

Operaciones unitarias y descripción del proceso	Equipos generalmente usados	Aplicación
<p><i>Pesaje de RSU por básculas:</i> En cualquier instalación de residuos, el pesaje de los vehículos es clave a la hora de gestionar las operaciones de forma rentable. Las básculas se utilizan para llevar a cabo un registro, mediante el pesaje de las entradas y salidas de las materias primas y productos generados en los centros de procesamiento de residuos.</p>	Fosa.	Se utilizan para pesar residuos transportados por tráileres o camiones largos.
	Rampa.	Se utilizan en los mismos casos que las de fosa, con la diferencia de que requieren más espacio para su operación (aproximadamente 32 m).
	Portátiles.	Las básculas portátiles se utilizan en empresas que funcionan, en un determinado lugar de manera provisional.
<p><i>Reducción de tamaño:</i> Es un proceso utilizado para la reducción de los RSU no seleccionados y de los materiales recuperados.</p>	Trituradora de molino de martillos (vertical u horizontal).	Para la trituración de los RSU no seleccionados.
	Trituradora cortante giratoria.	Para la trituración de los RSU no seleccionados y materiales reciclados.
	Trituradora de dos ejes.	Tienen una rotación inversa, son robustas y eficientes, e ideales para la reducción volumétrica y el desbaste de materiales. Pueden utilizarse para el tratamiento de cualquier tipo de residuos sólidos.
<p><i>Separación por tamaño:</i> Proceso en el que se separan los residuos según sus características de forma y tamaño.</p>	Criba vibratoria.	Para la selección por tamaño de residuos de jardín triturados.
	Tromeles.	Se utilizan para separar materia orgánica y para eliminar del proceso de materiales voluminosos.
	Cribas de discos.	Las cribas de discos ofrecen una elevada funcionalidad y una óptima relación calidad-precio para separar de forma perfecta un gran número de materiales y residuos.
<p><i>Separación por densidad:</i> Es una técnica ampliamente utilizada para separar materiales basándose en su densidad y características aerodinámicas.</p>	Clasificación por aire.	Es una unidad de operación diseñada para separar residuos con componentes ligeros, tales como el papel y plástico de materiales más pesados, basados en sus comportamientos diferenciales cuando se someten a una corriente de aire.
	Separador balístico.	Para separar residuos sólidos de entrada en función de sus características de tamaño, densidad y forma.
<p>Separación por campo electromagnético: Estas técnicas utilizan las propiedades eléctricas y magnéticas de los residuos.</p>	Separador magnético.	Para separar materiales férricos y no férricos.
	Separación electrostática.	Para separar plásticos de papeles, en base a las distintas características de carga superficial de los materiales.

Fuente: (Elaboración propia a partir de Pitchel, 2008)

Tabla 5.12 Procesos y equipos utilizados para el procesamiento de combustibles alternos (continuación)

Operaciones unitarias y descripción del proceso	Equipos generalmente usados	Aplicación
<p>Compactación:</p> <p>Es una operación básica que incrementa la densidad de los materiales residuales para almacenarlos y transportarlos más eficazmente. Existen varias tecnologías disponibles para la densificación de los residuos y materiales recuperados, incluyendo el empacamiento y peletización.</p>	Compactadoras estacionarias.	Los residuos se llevan y se cargan en una compactadora manual y mecánica.
	Compactadora móviles.	Es un equipo con ruedas o con orugas utilizado para colocar y compactar residuos sólidos en un relleno sanitario controlado.
	Prensa de cámara cerrada.	La prensa de cámara cerrada y atado con flejes de plástico se utiliza para compactar RSU, aplicando una gran presión específica, lo cual permite producir balas (pacas) de alta densidad.
	Envolvedoras con película extensible.	Las envolvedoras son una alternativa al equipamiento de compactación. Es un método rentable en la preparación de la FIRSU para realizar su transporte para las cementeras o cualquier otra industria que lo pueda aprovechar como combustible alternativo.
Manipulación de materiales.	Cinta transportadora.	Unir los distintos equipos a lo largo de todo el proceso.
	Tolva de recepción.	Se utilizan para dar entrada a los residuos y conducirlos hacia los diferentes equipos de separación y procesamiento.
	Cargador frontal.	Este equipo se utiliza para mover los RSU que llegan al centro de procesamiento, se diseñan con tren de rodaje y con neumáticos, siendo éstos últimos los más comunes; se utilizan también para transportar materiales a cortas distancias.
	Carretilla elevadora.	Este equipo también llamado montacargas sirve para transportar y apilar cargas generalmente montadas sobre tarimas.
Tecnología avanzada para procesar y generar residuos con alto poder calorífico.	Biodrum.	Este equipo se compone de un cilindro horizontal rotativo que homogeniza, desfibra y separa las diferentes fracciones, descomponiendo las partículas más blandas y permitiendo la clasificación del material más duro y de más alto poder calorífico.
	Rasor.	El Rasor es un triturador secundario para los procesos de producción de combustibles alternativos. La alimentación mediante tornillos asegura un consumo uniforme de potencia.

Fuente: (Elaboración propia a partir de Pitchel, 2008)

5.6.1 Visitas técnicas

Se realizaron dos visitas técnicas, la primera a la planta de selección de San Juan de Aragón y la otra a la planta empacadora de Iztapalapa para analizar la infraestructura con la que cuentan las plantas de selección y procesamiento de FIRSU que operan en México con base en los siguientes criterios de selección:

- ❖ Se analizaron las plantas más cercanas a la Ciudad de México y en las cuales nos otorgaran el permiso para realizar las visitas técnicas.
- ❖ Tanto la planta de San Juan de Aragón y la de Iztapalapa tienen una concesión directa y son operadas por CEMEX, lo que nos permitió observar cómo se realiza el procesamiento de las pacas FIRSU y cuáles son las tecnologías y equipos que ellos emplean para realizar su pretratamiento.

Planta de selección San Juan de Aragón

La planta de selección de San Juan de Aragón se localiza dentro de las instalaciones de la ET de la alcaldía Gustavo A. Madero junto a dos fases independientes de pepenadores que anteriormente laboraban en el relleno sanitario Bordo Poniente hasta su cierre, la superficie total del complejo es de aproximadamente 14 ha. En la Figura 5.24 se muestra el croquis de la ET de San Juan de Aragón y cada una de áreas que la integran.

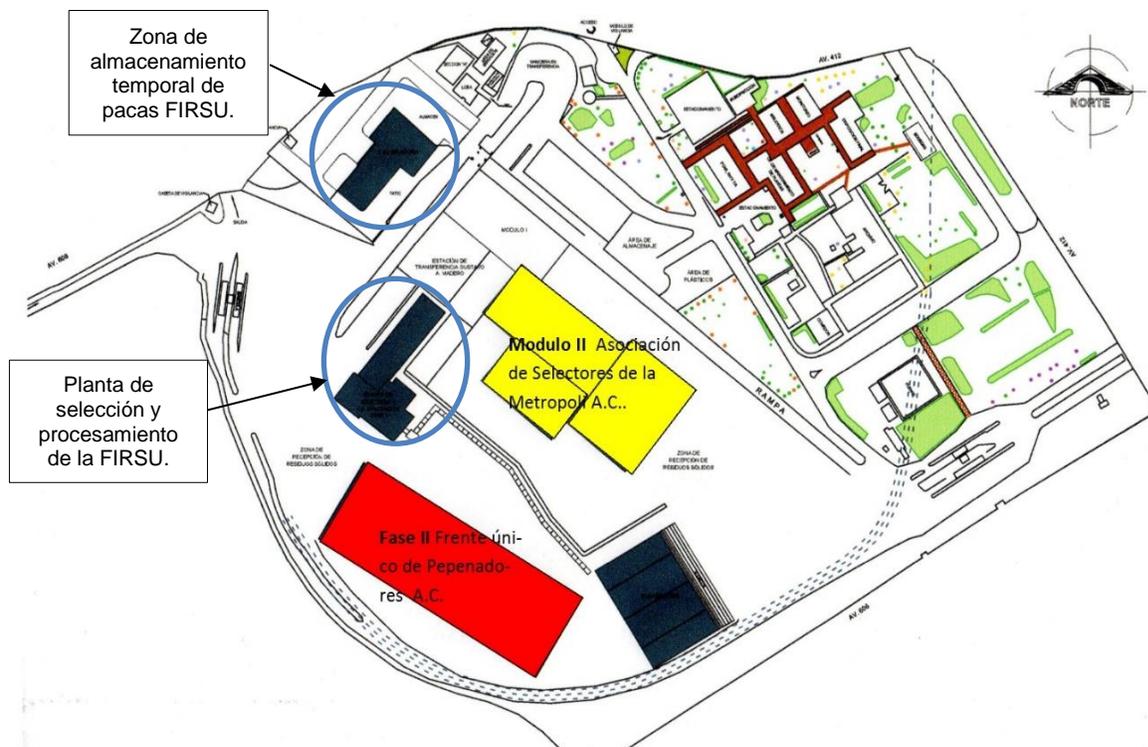


Figura 5.24 Croquis de distribución de la planta de selección San Juan de Aragón
Fuente: (Adaptado de Gutiérrez, 2015)

En la Ciudad de México se tiene un porcentaje de recuperación en las plantas de selección entre 3.90 y 6.70% de los residuos que ingresan, el resto va a dar a sitios de disposición final. Esto se debe principalmente a la falta de conciencia ambiental e infraestructura (SEDEMA, 2012)

La planta de selección comenzó a operar en el año 2012 y lleva en operación aproximadamente 3 años bajo la supervisión de la empresa CEMEX, solamente se recibe la FIRSU, la cual proviene principalmente de las ET de Benito Juárez, Azcapotzalco, Venustiano Carranza, Gustavo Madero y San Juan de Aragón, está conformada por las áreas de: pesaje, patio de recepción, fosa de descarga, dos líneas de selección y equipos de procesamiento (dos separadores magnéticos tipo Overband, un separador de materia orgánica tipo Splitter y una empacadora-embolsadora).

Cuando se llevó a cabo la instalación de la planta de selección se tomaron en cuenta principalmente aspectos económicos y técnicos debido a que se instaló la planta en el mismo predio de la ET de San Juan de Aragón, para disminuir los costos en adquirir un nuevo terreno, en los aspectos técnicos se consideró instalar equipo y maquinaria para llevar a cabo el procesamiento de la FIRSU de una manera más “optimizada”, así mismo los costos de transporte de los camiones recolectores y los transfer que llegan a la ET pueden descargar gran parte de estos residuos aprovechando tanto los residuos valorizables (reúso y reciclaje) como los residuos cuyo poder calorífico los hacen factibles para ser utilizados como combustible alternativo en los hornos cementeros.

En cuanto a los aspectos sociales y ambientales no se tomaron en cuenta debido a que en la actualidad la planta se encuentra en una área dentro de la mancha urbana, esto genera la inconformidad de la población debido a problemas de aspecto sanitario en cuanto olores y un mal aspecto por la inmensa cantidad de basura que reciben a diario (véase Figura 5.25).



Figura 5.25 Patio de recepción de residuos de la planta de selección San Juan Aragón
Fuente: (Elaboración propia)

El personal que labora en la planta está conformado aproximadamente por 100 trabajadores, entre los cuales destacan:

- ❖ Personal administrativo (Ayudante general).
- ❖ Personal de selección de residuos.
- ❖ Personal de limpieza.
- ❖ Personal técnico y operativo.
- ❖ Personal de mantenimiento.

Se trabaja 20 horas por día en tres turnos, el domingo se les da a los equipos un mantenimiento preventivo.

En el área de la planta primeramente se depositan los residuos en una fosa la cual presenta serios problemas de taponamiento por la inmensa cantidad de residuos que llegan a la planta (a), después mediante una banda transportadora inicial los residuos se conducen para ser separados y procesados (b) (véase Figura 5.26).



Figura 5.26 Fosa de depósito (a) y banda inicial de transporte de residuos (b)
Fuente: (Elaboración propia)

Posteriormente se realiza la primera separación de residuos metálicos mediante un separador magnético tipo Overband, después mediante dos líneas de selección manual se separan los residuos valorizables: PET, PVC, vidrio, escombro, piel, pañales y nuevamente el remanente de los residuos metálicos que no lograron separarse mediante el separador magnético (véase Figura 5.27).



Figura 5.27 Primera línea de selección manual de residuos valorizables
Fuente: (Elaboración propia)

Después que se realiza la selección de los residuos valorizables, el remanente de la FIRSU se procesa para ser empelada como combustible alterno en los hornos cementeros. Primero se separan los residuos metálicos mediante un separador tipo Overband para evitar que en el coprocesamiento en los hornos se generen emisiones que afecten el ambiente y la salud humana (véase Figura 5.28), posteriormente se separa la fracción orgánica mediante un separador tipo Splitter (véase Figura 5.29). Por último se reduce el volumen de la FIRSU mediante una compactadora de prensa cerrada y se embolsa para ser transportada a los hornos cementeros (véase Figura 5.30).



Figura 5.28 Separador magnético tipo Overband
Fuente: (Elaboración propia)



Figura 5.29 Separación de la materia orgánica por el separador tipo Splitter
Fuente: (Elaboración propia)

La mayoría de los equipos funciona con energía eléctrica (aproximadamente 440 volts) y con una fuerza de 100 HP. La fuerza de compactación de la empacadora es de 1,800 a 2,000 kN, pues depende del tipo de residuos que compacte y la cantidad de humedad que contengan. Se generan aproximadamente 350 t/día, es decir 270 pacas FIRSU de 1.30 toneladas.

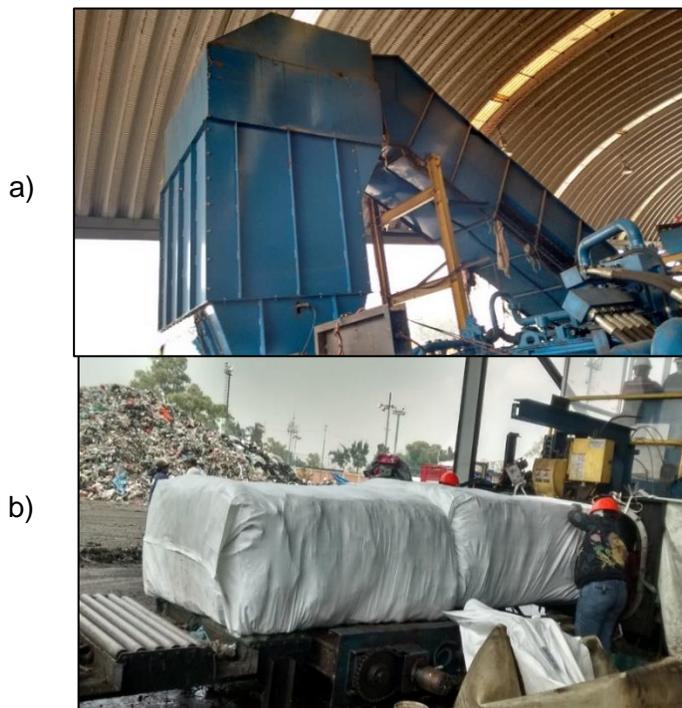


Figura 5.30 Compactación (a) y embolsado de la FIRSU (b)
Fuente: (Elaboración propia)

Planta empacadora Iztapalapa

La planta empacadora de Iztapalapa se localiza dentro de la ET de la delegación Iztapalapa, lleva poco tiempo en operación aproximadamente un año y medio, comenzó en julio de 2014, al igual que la planta de selección de San Juan de Aragón, donde se aprovecha la FIRSU, su instalación se llevó a cabo dentro de la ET para optimizar la recepción y el procesamiento de los residuos, así como los recursos económicos que se llevaría en adquirir un nuevo terreno.

La planta recibe los residuos de rechazo del módulo 2 de separación que forma también parte de la ET de San Juan de Aragón, así como los residuos que se originan en las delegaciones de Iztacalco, Gustavo A. Madero, Iztapalapa y la central de abastos. Se reciben al día 530 toneladas de residuos sólidos inorgánicos y se procesan unas 400 toneladas al día. Cada paca de residuos pesa entre 1,400 a 1,520 kg; la producción es de aproximadamente 320 pacas/día. Las pacas que producen son enviadas a las plantas cementeras en Monterrey, Hidalgo o Puebla.

La superficie de la empacadora es de aproximadamente una ha. En la Figura 5.31, se muestra una maqueta de la distribución de la ET de Iztapalapa y se señala la ubicación de la planta empacadora en la actualidad.



Figura 5.31 Maqueta de la ET de Iztapalapa
Fuente: (Elaboración propia)

Está conformada por las siguientes áreas y equipos: pesaje, patio de recepción y maniobras, fosa de descarga, una línea de selección y equipos de procesamiento (dos separadores magnéticos tipo Overband, un separador de materia orgánica tipo Splitter y una compactadora-embolsadora).

En la Figura 5.32 se describe de manera general como opera la planta, primero se depositan los residuos en un patio de recepción para después vaciarlos en una banda transportadora inicial, los residuos son transportados a un tolva y un equipo rompe bolsas, después mediante un separador magnético montado en la parte superior de una banda transportadora se separan los residuos metálicos, mediante la misma banda son transportados a un separador o criba tipo

Splitter para separar la materia orgánica, la FIRSU que sigue en la banda se somete a una segunda separación mediante un separador magnético, por último la FIRSU es compactada y envuelta mediante una empacadora-envolvedora para ser transportada a los hornos cementeros.

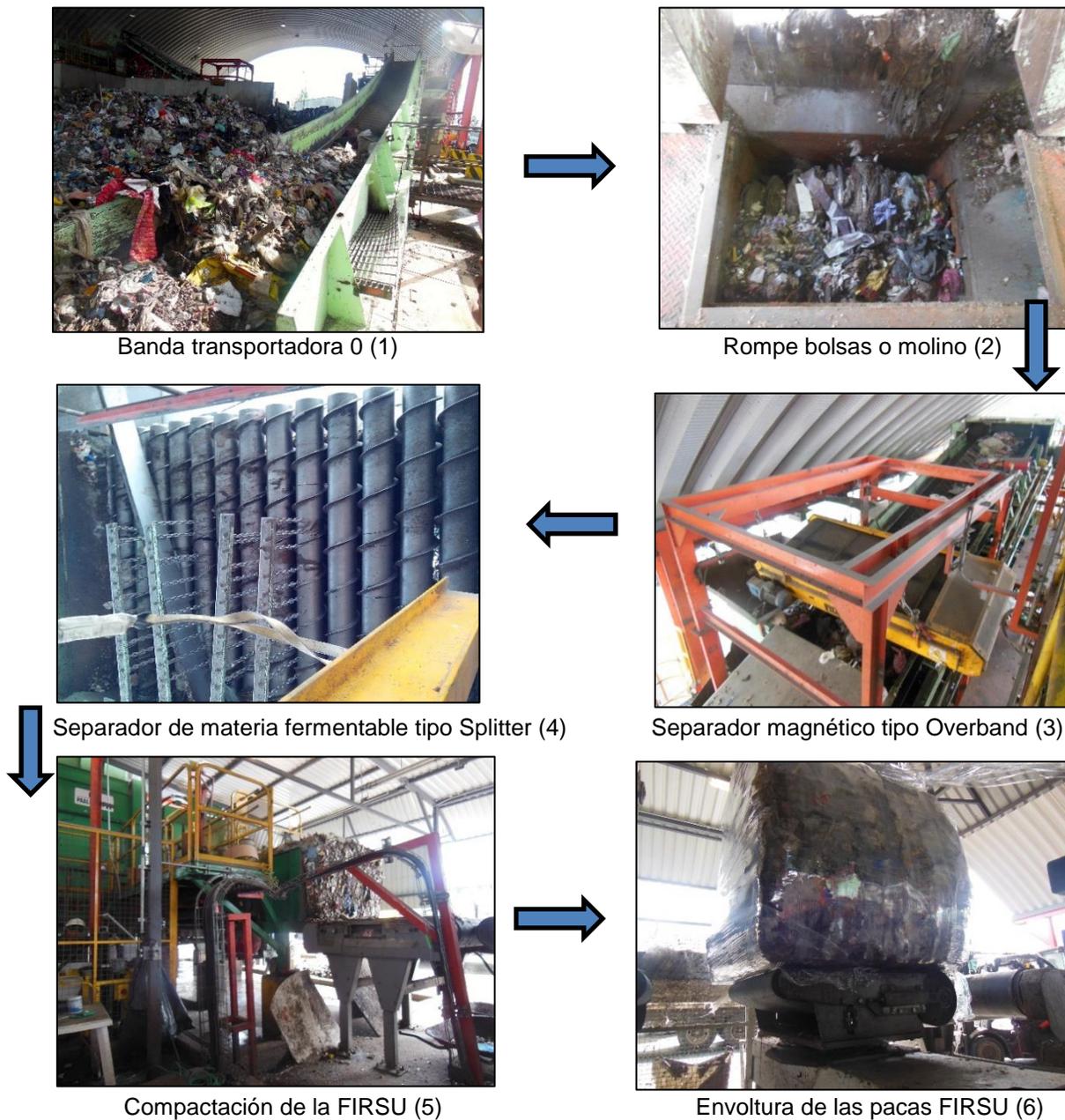
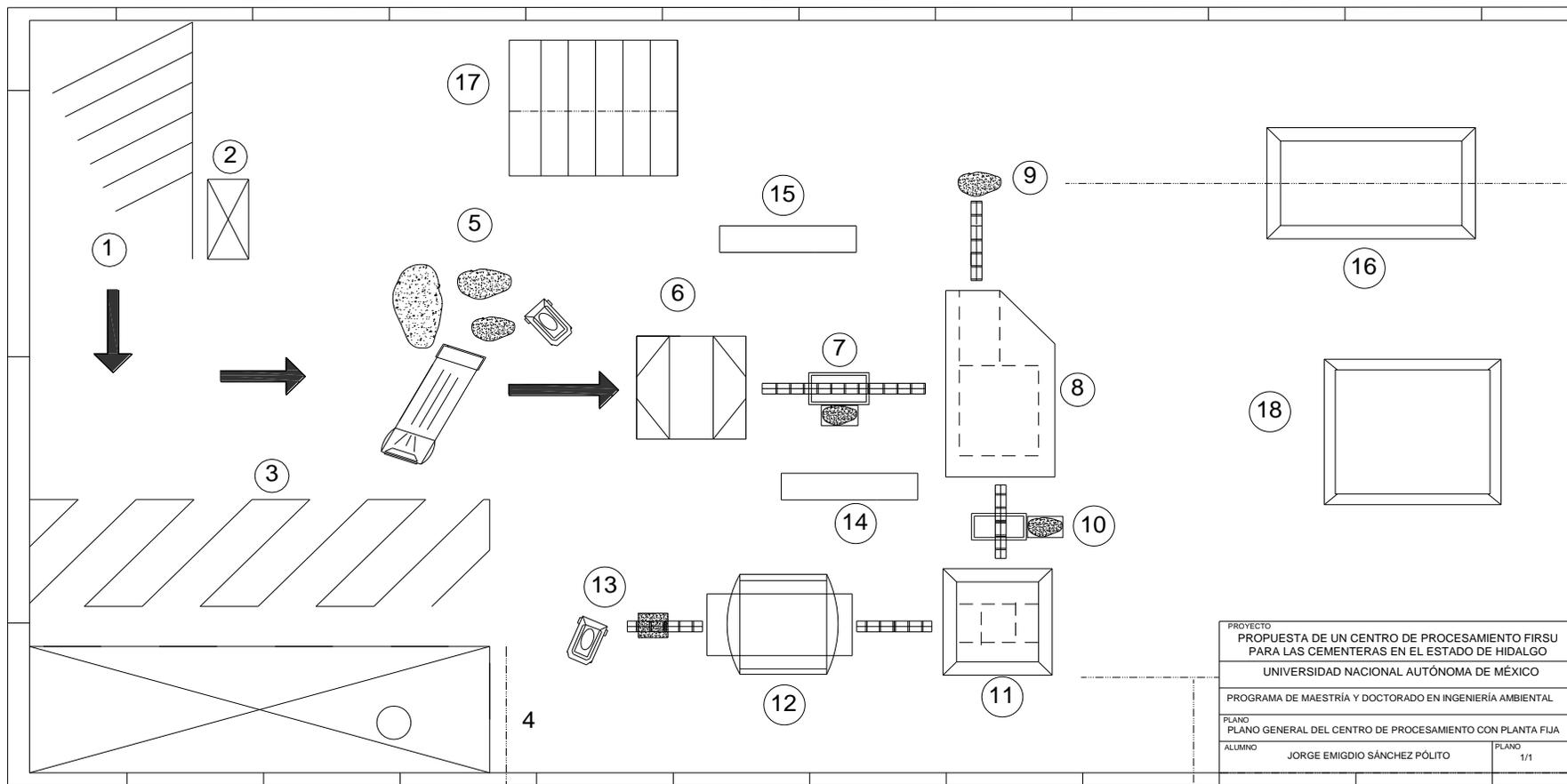


Figura 5.32 Procesamiento de las pacas FIRSU

En la figura 5.33 se muestra el croquis de distribución en planta de la infraestructura (maquinarias y equipos) que puede ser empleada en el CP-FIRSU con base en las visitas técnicas realizadas.



1) Báscula de pesaje.	6) Tolva y trituradora.	11) Compactación y flejado.	16) Edificio de administración y dirección.
2) Caseta de control.	7) Separador magnético.	12) Envolvedora.	17) Aparcamiento de autos.
3) Aparcamiento de camiones.	8) Clasificador.	13) Manejo y transporte de Pacas FIRSU.	18) Área de almacenamiento temporal de las pacas FIRSU.
4) Taller de mantenimiento.	9) Material orgánico.	14) Caseta de acometida eléctrica.	
5) Zona de recepción de residuos.	10) Separador magnético (2).	15) Depósito de agua.	

Figura 5.33 Croquis de distribución en planta de la infraestructura del CP-FIRSU

5.6.2 Descripción técnica de maquinaria y equipos que se emplearan en el CP-FIRSU

A) Maquinaria

1. Básculas

En cualquier instalación de residuos, el pesaje de los vehículos es clave a la hora de gestionar las operaciones de forma rentable.

Las básculas (de rampa, portátiles o de fosa) se utilizan para llevar a cabo un registro, mediante el pesaje de las entradas y salidas de las materias primas y productos generados en los centros de procesamiento de residuos. Para el pesaje es necesario seleccionar la báscula tomando en cuenta su capacidad máxima y los productos que se van a pesar; la longitud de los camiones transportadores y la rapidez con la que se deba operar la báscula que se utiliza.

Una báscula de fosa (véase Figura 5.34) es una solución viable en aquellos casos en que el patio de un centro de procesamiento no cuente con el espacio suficiente para maniobrar, no requiere de rampas ni muros de contención. Se utilizan para pesar residuos transportados por tráileres o camiones largos.



Figura 5.34 Báscula de fosa Torrey
Fuente: (Camioneras, 2013)

2. Cargador frontal

Este equipo se utiliza para mover los RSU que llegan al centro de procesamiento para vaciarlos en la tolva de recepción y sean procesados, se diseñan con tren de rodaje y con neumáticos, siendo éstos últimos los más comunes; se utilizan también para transportar materiales a cortas distancias (véase Figura 5.35).

Cuando están provistos de ruedas, su bastidor es articulado, y es fijo cuando se diseña con tren de rodaje. El cargador con neumáticos cuenta con tracción en las cuatro ruedas. Su capacidad varía entre 4 a 5 m³, para materiales que pesen en promedio 800 kg/m³.



Figura 5.35 Cargador Frontal modelo CLG835
Fuente: (Liugong, 2015)

3. Grúas pedestales

Se utilizan principalmente para el manejo de RSU. Como se muestra en la Figura 5.36, están construidas de un acero sólido electro soldado y son operadas mediante sistemas hidráulicos compuestos por componentes de la más alta calidad. Mediante su brazo articulado de largo alcance y una cuchara tipo pulpo para agarrar y vaciar los RSU a la tolva de recepción para que sean procesados.



Figura 5.36 Grúa pedestal modelo COLMAR F63
Fuente: (Logismarket, 2015)

4. Montacargas

Es un vehículo contrapesado en su parte trasera, que mediante dos horquillas, puede transportar y apilar cargas generalmente montadas sobre tarimas o palets.

Los materiales empacados son fáciles de cargar con carretillas elevadoras y pueden transportarse rentablemente por su alta densidad en bruto (véase Figura 5.37). En un CP-FIRSU se utilizan principalmente para transportar las pacas FIRSU.



Figura 5.37 Montacargas
Fuente: (Torcal, 2015)

5. Tolvas de recepción

Se utilizan para dar entrada a los residuos y conducirlos hacia los diferentes equipos de separación y procesamiento (véase Figura 5.38). Existen tolvas de masa que requieren de un flujo uniforme de densidad constante y de indicadores de nivel, las que a pesar de su utilidad tienen la desventaja de que algunos residuos pueden quedarse atorados en zonas muertas, con el consiguiente riesgo de descomposición.



Figura 5.38 Tolva de recepción

A) EQUIPOS

1. Transportador tipo PB

El transportador tipo PB (véase Figura 5.39) se utiliza en alimentaciones de inicio de proceso. Es un transportador de placas con dos cadenas sin-fin conectadas entre sí por las mismas placas.

Es muy robusto y se instala con una inclinación de unos 40°, debajo de una tolva de recepción, alimentando y dosificando el material hacia el proceso (véase Figura 5.40).



Figura 5.39 Transportador tipo PB
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

Características técnicas de los equipos propuestos:

TRANSPORTADORES PB

ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (mm)	Inclinación	Tipo de banda	Potencia (kW)
AL-101	Transp. Alimentación	11.0	1.60	40°	Placas	2x7.5
AL-101B	Transp. Alimentación	11.0	1.60	40°	Placas	2x7.5

1. Bancada tensora
2. Conjunto de lamas de apoyo de las placas
3. Paredes laterales superiores
4. Bancada motriz
5. Tapas inferiores
6. Bancadas centrales
7. Pie con base afinadora
8. Tolva de recogida de finos



Figura 5.40 Componentes del transportador tipo PB
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

2. Abridor de bolsas TM 5000 E

El Triturador tipo TM 5000 E (véase Figura 5.41) es un equipo diseñado y fabricado por *Komptech* (empresa austríaca de primera calidad) cuya misión es la reducción del tamaño de los residuos voluminosos o de residuos con elevada resistencia.

El equipo dispone de un rotor que gira a bajas revoluciones accionado mediante un motor eléctrico. El sistema de transmisión del motor al rotor está formado por dos motores hidráulicos de desplazamiento y dos embragues de tipo planetario por cada lado del rotor. La velocidad de giro del rotor se puede controlar mediante un potenciómetro.

El rotor incorpora una serie de dientes-desgarradores, dispuestos en espiral a lo largo de toda su superficie, que abren las bolsas al desgarrarlas contra unos dientes fijos. La distancia entre los dientes del rotor y los desgarradores estáticos es regulable mediante un sistema hidráulico.

Características técnicas del equipo propuesto:

Acondicionamiento eléctrico:	Potencia: 200kW. Voltaje: 400-690V.
Tambor de trituración:	Dientes altamente resistentes al desgaste. Longitud del tambor de trituración: 3000mm. Dientes blindados.
Contra cuchilla TM-U blindada:	Superficie del diente plana. Número total de dientes: 16.
Sistemas de trituración:	Revoluciones del tambor regulables de forma progresiva, sin escalones.
Sistema de accionamiento:	La velocidad máxima del tambor: 29 / min (29 rpm) Altura de carga : Depende de la estructura soporte.
Tolva de carga	Anchura de carga: 4.60 m (en tolva estándar). Profundidad de carga: :Hasta 2.90 m (en tolva estándar). Para poder limpiar de forma segura y ergonómica el rotor del equipo, existe una compuerta lateral que se abre mediante una bomba hidráulica y que permite el acceso al interior del equipo con la máxima fiabilidad y comodidad.
Sistemas de seguridad y limpieza:	



Figura 5.41 Abridor de bolsas TM 5000 E
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

3. Transportadora Tipo UP

Las cintas transportadoras son los equipos más utilizados para la manipulación de residuos, se utilizan para trasladar RSU no seleccionados así como materiales reciclados. También se utilizan para trasladar materiales en las líneas de conducción, donde se pueden seleccionar manualmente los materiales reciclados. Una transportadora es una cinta sin fin, apoyada sobre rodillos libres antifricción y conducida desde un extremo por un rodillo motriz. Las cintas se hacen de goma, lona o materiales sintéticos para manipular materiales reciclados que son relativamente ligeros.

El transportador tipo UP (véase Figura 5.42) se utilizan para el transporte de residuos orgánicos e inorgánicos, férricos y finos, por esta cuestión la banda de estos transportadores se desplaza por encima de estaciones de rodillos inclinadas.

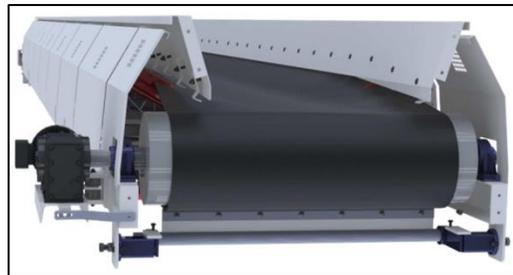


Figura 5.42 Transportador tipo UP
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

Está conformado por chasis en base a perfil laminado reforzados. Mediante la unificación de diferentes chasis estándares, juntamente con los cabezales motriz y tensor, se consigue la longitud deseada para cada transportador. La fabricación de forma modular y con todos los elementos atornillados permite una gran seguridad en el montaje, así como posibles modificaciones de los equipos (véase Figura 5.43).

Características técnicas de los equipos propuestos:

Calidad de la banda:	La banda del transportador está formada por varias capas de tejidos de fibras sintéticas de poliéster-nylon, resistente a grasas y aceites de tipo EP 400/3, 4:2mm, de las marcas Dunlop, Goodyear o similar.
Paredes laterales:	Están construidas con chapa de acero de 3 mm de espesor, soportadas por pletinas atornilladas al chasis del transportador. Están realizados con UPN-120 mm, que disponen de una base afinadora regulable para poder nivelarlos según las necesidades del pavimento.
Soporte del transportador:	Este tipo de transportadores disponen de dos rascadores; un rascador para la parte exterior de la banda, regulable en altura y ángulo de trabajo (gracias a dos soportes ROSTA), que se coloca en la parte inferior del cilindro motriz.
Rascador limpiador:	La tolva de descarga está fabricada con chapa laminada de 3 mm de espesor. Está diseñada para recoger el material limpiado por el rascador.
Tolva de descarga:	Para evitar accidentes, el cilindro conducido dispone de una protección exterior. En el caso en que el transportador disponga de pasarela de mantenimiento, se instalará un paro de emergencia por tirón de cable.
Protecciones:	En el caso en que el transportador tenga una inclinación elevada (a partir de 20°), se suministrará banda con perfiles, cilindros inferiores de Ø 89 mm sin anillos limpiadores, rascador con cepillo y motor con freno.
Transportadores con inclinación elevada:	

Características técnicas de los equipos propuestos:

Transportadores UP ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (mm)	Inclinación	Tipo de banda	Potencia (kW)
CT-103	Transporte a Trommel	21	1.60	19°	Lisa	5.5
CT-103B	Transporte a Trommel	21	1.60	19°	Lisa	5.5
CT 201	Transporte a Trommel	13	1.20	4°	Lisa	3
CT 202	Transporte a Trommel	13	1.20	4°	Lisa	3
CT 203	Transporte fracción orgánica	18	1.40	10°	Lisa	4

Componentes del transportador tipo UP

1. Bancada tensora
2. Tapas laterales
3. Bancada motriz
4. Rodillos en artesa

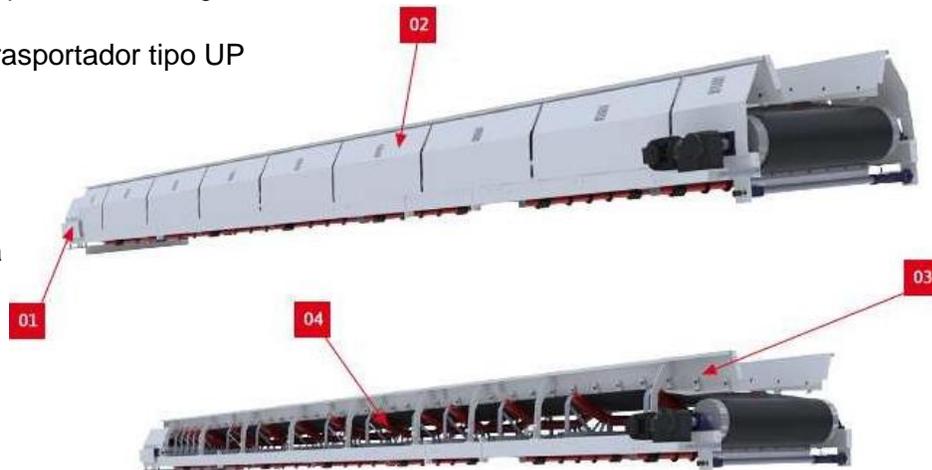


Figura 5.43 Componentes del transportador tipo UP
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

4. Transportador Tipo PA

El transportador tipo PA se utiliza para el transporte de fracción de alimentación, rechazo, envases, planares y voluminosos (véase Figura 5.44) .

El transportador consta de una banda resistente a grasas y a aceites tipo EP 400/3, con recubrimiento 2:0 mm, que es accionada por un motor-reductor y se desliza sobre un chasis conformado por bancadas de chapa (véase Figura 5.45).



Figura 5.44 Transportador tipo PA
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

Características técnicas de los equipos propuestos:

Transportadores PA

ID	Descripción	Longitud (m)	Ancho (mm)	Inclinación	Tipo de banda	Potencia (kW)
CT-105	Transporte a Selección	27	1.20	19-0°	Lisa	5.5
CT-105B	Transporte a Selección	27	1.20	19-0°	Lisa	5.5
CT-109	Transporte Inclinado rechazo	17	1.20	15°	Lisa	3
CT-110	Transporte reversible By-Pass	7.0	1.20	0°	Lisa	3

1. Conjunto motriz
2. Angulo de soporte de las paredes
3. Conjunto tensor
4. Tapas del tensor
5. Rascador
6. Banda

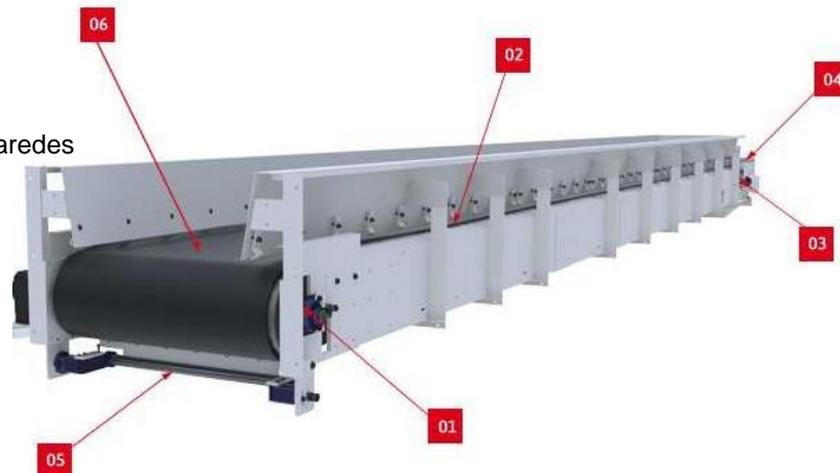


Figura 5.45 Componentes del transportador PA
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

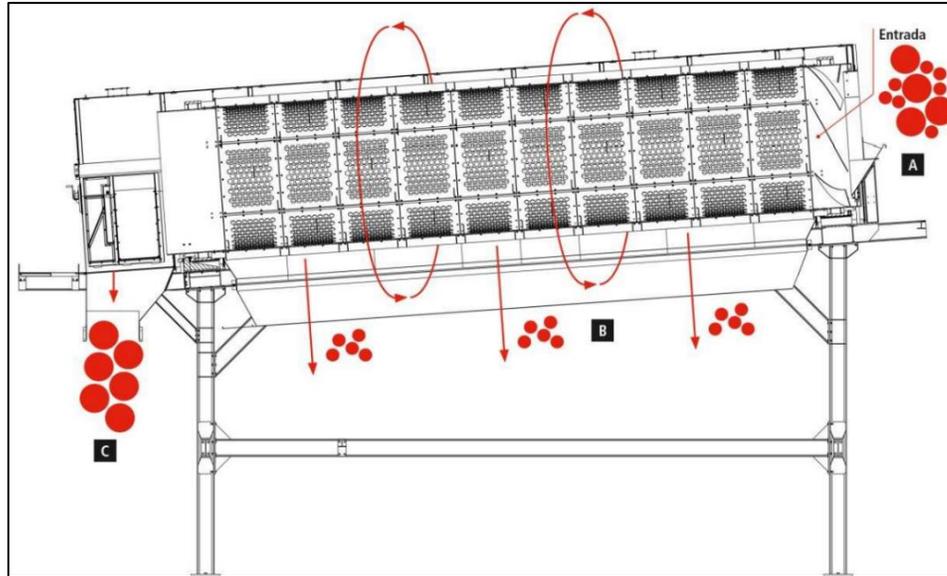
5. Trommel estacionario

Los trommeles de cribado son una parte fundamental de las instalaciones de tratamiento de residuos (véase Figura 5.46), ya que la mayor parte de los pre-tratamientos mecánicos a los que son sometidos los residuos dependen de su eficiencia de separación. Los trommeles se utilizan en una gran variedad de aplicaciones: para separar la materia orgánica en plantas de RSU y envases, para eliminar del proceso materiales voluminosos o para separar inertes en plantas de composta.



Figura 5.46 Trommel de cribado
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

Como se muestra en la Figura 5.47 el equipo está compuesto por un tambor inclinado a 4° que recibe el material por la parte alta (A), el material se va desplazando hacia la parte baja por el movimiento de rotación del tambor y por gravedad. Durante este recorrido, el material suficientemente pequeño atraviesa la criba del tambor y es conducido a unas tolvas inferiores (B). El material grueso se descarga a otra tolva al final del tambor (C).



5.47 Vista transversal del funcionamiento del Trommel
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

Características técnicas del equipo propuesto:

CAPACIDAD

La capacidad del Trommel modelo TR2.5/12/14 es de aprox. 155 m³/h.

DIMENSIONES TOTALES

Longitud:	15.53 m
Ancho:	3.38 m (incluyendo motores)
Alto:	3.42 m (sin contar con estructura de soporte)
Peso del equipo:	29 toneladas aprox.

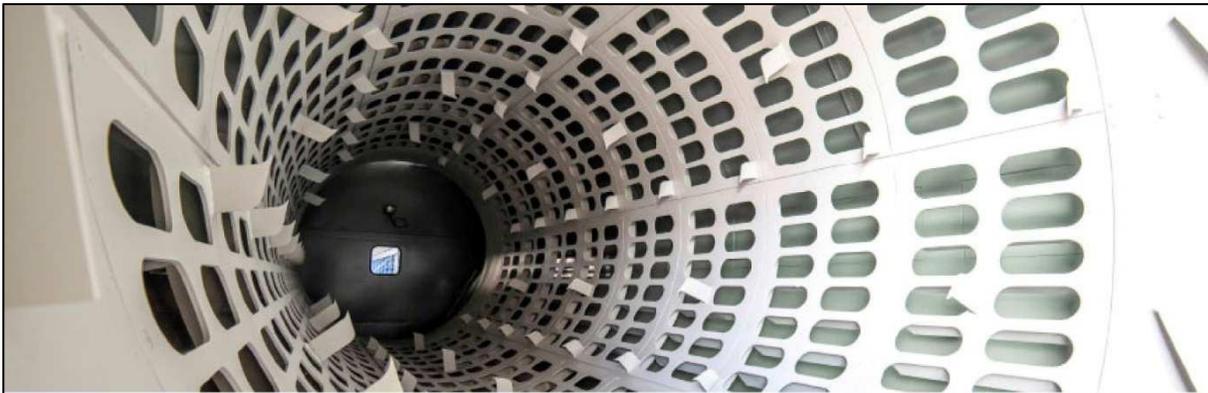
TAMBOR DE CRIBADO

Área de cribado:	95 m ²
Revoluciones de giro:	9-15 rpm (nominal 12 rpm)
Diámetro:	2.50 m
Longitud de cribado:	12.0 m
Longitud del tambor:	14.0 m
Dimensiones del agujero de cribado:	Ø 80 mm
Espesor de la malla:	10 mm

MOTOR Y TRANSMISIÓN

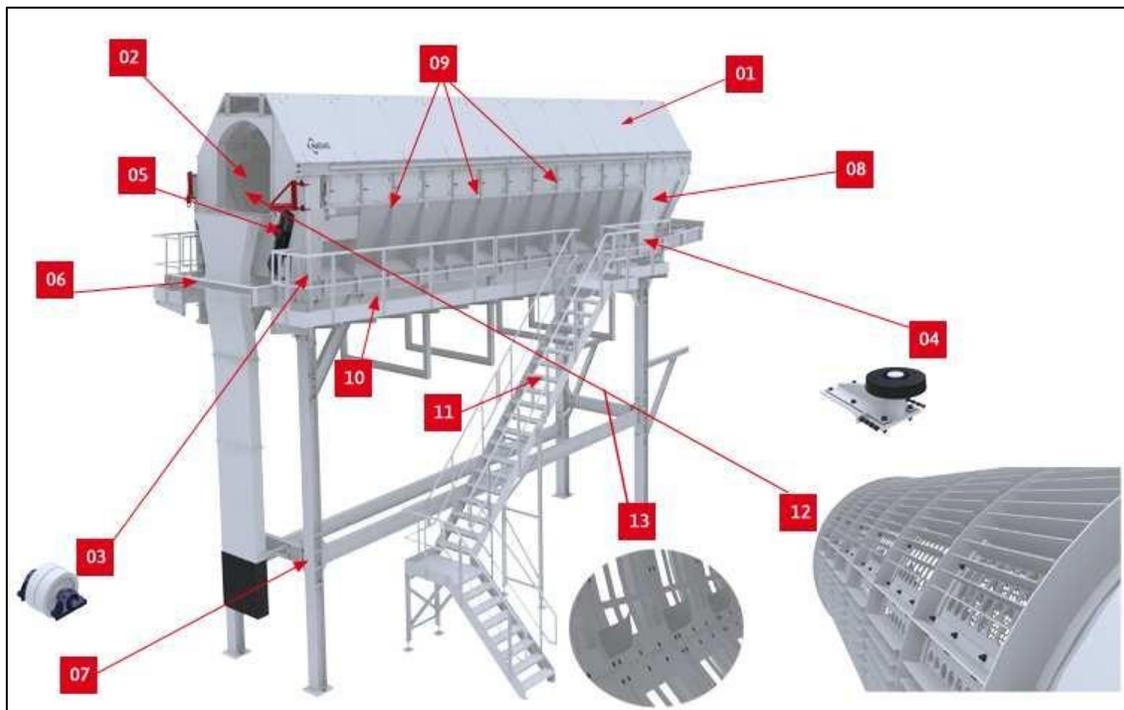
Tipo:	Motor reductor marca SEW
Potencia:	2x15 kW
Freno del motor:	En el eje motriz
Tipo de mecanismo impulsor:	Transmisión directa a través de 2 ruedas Ø 500 mm

En la Figura 5.48 se muestra la vista interior del tambor de cribado que forma parte de un Trommel modelo TR2.5/12/14.



5.48 Vista interior del tambor de cribado de un Trommel modelo TR2.5/12/14
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

En la Figura 5.49 se muestran los componentes principales que conforman un Trommel modelo TR2.5/12/14.



- | | | |
|---|--|-------------------------------|
| 1. Cobertura superior en chapa y protecciones | 5. Motorreductor | 9. Ventanas de inspección |
| 2. Tambor de cribado | 6. Cuerpo principal del Trommel | 10 Pasarelas de mantenimiento |
| 3. Ruedas de alta resistencia al desgaste | 7. Pies de soporte | 11. Escalera de acceso |
| 4. Rueda guía | 8. Puerta de acceso al interior del equipo | 12. Sistemas anti-flejes |
| | | 13. Púas rompe bolsas |

5.49 Componentes principales que conforman un Trommel modelo TR2.5/12/14
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

6. Electro-imán (separador electromagnético)

El separador electromagnético de limpieza automática (Overband) está diseñado para extraer y recuperar las piezas ferromagnéticas que se encuentran entre el material que circula por una cinta.

El separador magnético tipo Overband se compone por un potente electro-imán que forma a su vez la estructura principal o cuerpo soporte de una pequeña cinta nervada que envuelve al electro-imán. Unos pequeños bastidores solidarios al electro-imán soportan los tambores motriz y de reenvío y el motorreductor para el arrastre de la cinta.

Como se muestra en la Figura 5.50, la pieza ferromagnética que circule por la cinta transportadora, al entrar en el campo magnético generado por el electro-imán, es atraída y asciende hasta la cinta que rodea al electro-imán. Los nervios de esta cinta arrastran a las piezas férricas hasta sacarlas del campo magnético generado por el electro-imán en donde se desprenden libremente.

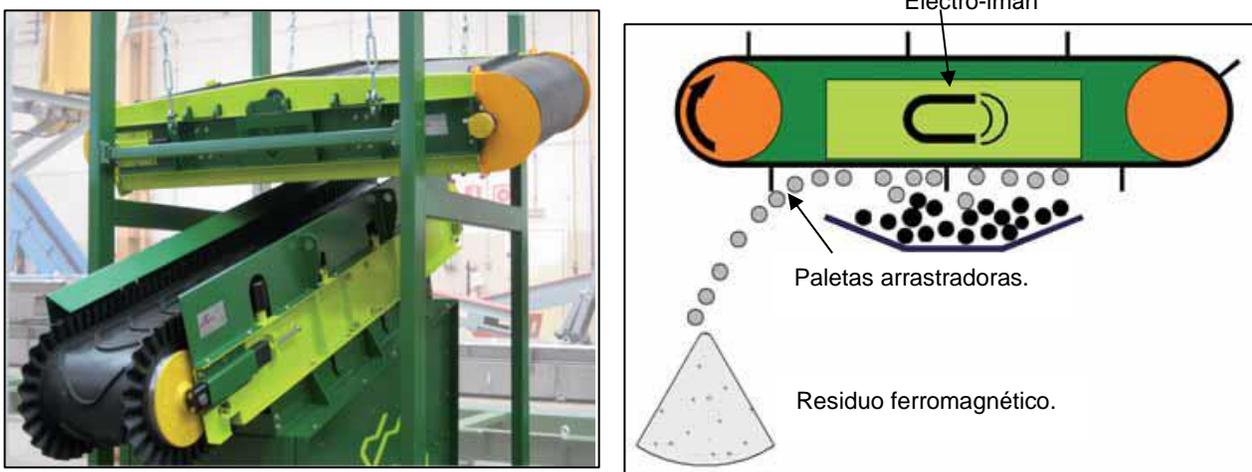


Figura 5.50 Separador electromagnético tipo Overband
Fuente: (Adaptado de Cometel, 2008)

El montaje de estos separadores puede realizarse de forma transversal sobre la cinta transportadora o de forma longitudinal en cabeza de cinta (véase Figura 5.51).



Figura 5.51 Separador magnético tipo Overband
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

La elección del separador ideal y el montaje más adecuado va a depender de diversos factores:

- ❖ Tipo de producto.
- ❖ Velocidad y caudal del transporte.
- ❖ Granulometría del residuo.
- ❖ Dimensiones del material magnético.

Características técnicas del equipo propuesto:

DISTANCIA MÁXIMA DE SEPARACIÓN

Para poder llevar a cabo la separación con una mayor eficiencia el electro-imán se debe posicionar a una distancia de 0.380 m de la transportadora. Esta distancia permite el paso del material de la cinta y a la vez optimiza el rendimiento de separación.

CONSTRUCCIÓN

Compuesto de 2 cilindros, uno motriz y otro conducido, y por una cinta de caucho con perfiles de arrastre transversales.

ACCIONAMIENTO

Motor-reductor SEW Eurodrive a grupo cónico tipo KA, con eje hueco.

Fijado directamente sobre el eje y soportado con un brazo de reacción que dispone de tacos amortiguadores para evitar posibles vibraciones del grupo.

ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura del separador magnético se utiliza para poder instalar este equipo de forma versátil y de fácil acceso en cualquier punto de una instalación. Para poder regular la altura entre el separador y la cinta, éste está sujeto a la estructura mediante unas cadenas que permiten el movimiento del mismo.

TOLVAS DE DESCARGA

Tanto la parte final de la cinta donde va situado el separador como la tolva de descarga de los materiales férricos se fabrican en aluminio para evitar interferencias.

La tolva de descarga viene mejorada con un rodillo que acompaña el material dentro de la tolva y evita posibles pérdidas

7. Plataforma y cabina selección

Características técnicas del equipo propuesto:

Plataforma:

La plataforma está formada por pórticos de soporte y separación, contruidos con perfiles HAE de 140 mm y unidos entre sí por las propias bases que forman el suelo de la cabina.

Éstas están contruidas con perfil UPN de 80 mm y rematadas por la parte superior con chapa de acero de 4 mm.

El acceso a la plataforma se hace por medio de escaleras con barandillas, conformes a las normas de seguridad. Éstas están contruidas con perfiles de acero (ángulos y vigas) y recubiertos con emparrillados galvanizados y antideslizantes con separaciones entre mallas de 30 x 30 mm.

Cabina:

Sobre la plataforma conformada por las bases de UPN de 80 mm, se ubica la cabina tipo TAVER-INSTACLACK de paneles "sándwich" no inflamables, unidos entre sí por fijaciones rápidas. Esta cabina es de aislamiento térmico y acústico de alta calidad.

La cabina está diseñada con las puertas necesarias de 2100 x 950 mm, con mirilla de 600 x 400 y con ventanas de aluminio de 1000 x 900 mm con cristal doble. Esta cabina está equipada con una instalación completa de iluminación. La cabina de triaje es conforme a las normas de seguridad válidas para los lugares de trabajo. La cabina de triaje, dispone de forma opcional, el sistema de climatización por aire renovable o aire acondicionado tipo "Split".

En la Figura 5.52 se muestra la plataforma y cabina de selección.



Figura 5.52 Plataforma y cabina de selección
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

8. Prensa de cámara cerrada HTR

Descripción técnica:

La HTR es una prensa automática de cámara cerrada y compactación de alta densidad. Posee una alta experiencia en compactar RSU, además que presenta una innovación técnica más futurista, esto hace que la HTR una referencia imprescindible en el sector de las prensas de pacas de la FIRSU o cualquier otro tipo de residuo valorizable (véase Figura 5.53).

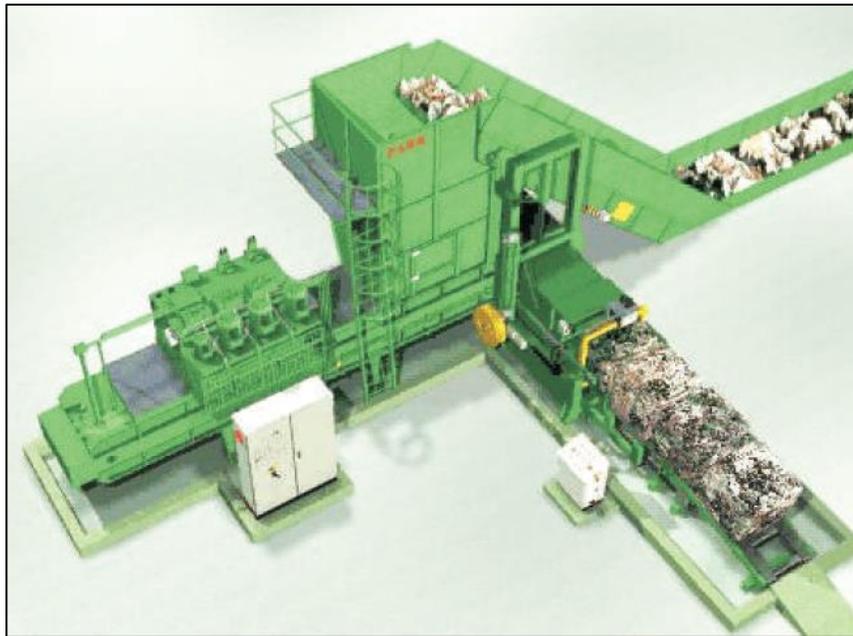


Figura 5.53 Prensa de cámara cerrada con atado de plástico modelo HTR
Fuente: (Adaptado de PAALGROUP, 2013)

La compactación del material se realiza con una fuerza de 1200kN o 1950kN en una cámara cerrada de prensado, consiguiendo así pacas de máxima densidad. El sistema de atado está ubicado por separado del proceso de compactación, con lo que se evitan casi por completo las anomalías a causa de impurezas. En la Figura 5.54 se describen las principales características y la composición de la prensa de cámara cerrada HTR.

Características técnicas:

SISTEMA HIDRÁULICO

El circuito hidráulico autónomo en el túnel telescópico permite continuar compactando durante el atado.

Los bloques hidráulicos con amplias secciones permite a los cilindros reducir al mínimo las pérdidas térmicas y de potencia.



PLATO TENSOR

El plato tensor se mueve con toda precisión gracias a los grandes rodillos de rodadura en combinación con guías laterales extremadamente anchas y un sistema guía central. Esta interacción tan perfeccionada garantiza además un bajo desgaste.



CAMARA DE PRENSADO

Es muy robusta, tiene puertas muy amplias y accesibles por los dos lados, para facilitar el mantenimiento de la cámara.



ATADO

El uso de materiales de atar hechos de polietileno repercute en unos costos operativos más bajos en comparación con otros materiales.

La HTR es la prensa de cámara cerrada de mayor éxito comercial porque tiene una mayor rentabilidad gracias a que la compactación y el atado se realizan simultáneamente.

Las pacas con fleje de plástico resultan ideales para el reciclaje térmico porque el material de atar se consume sin dejar residuos.



SISTEMA DE CORTE

La contra-cuchilla posee un amplio ángulo de corte, permitiendo así reducir las fuerzas de cizallamiento, lo que se traduce a su vez en una gran resistencia al desgaste y la ausencia de mantenimiento.



CANAL DE PRENSADO

Un túnel telescópico permite compactar y atar simultáneamente, de forma que se incrementa el rendimiento de paso de la prensa. El túnel telescópico permite que la bala se expanda ligeramente antes del atado, reduciendo así las fuerzas de expansión.

Las prensas de alto rendimiento HTR son capaces por eso de generar a un alto ritmo de producción balas más compactas que ninguna otra máquina comparable existente.

Figura 5.54 Características técnicas y composición de la prensas de cámara cerrada HTR
Fuente: (Adaptado de MASIAS Recycling, 2015)

9. Sistema de enfardado

El enfardado es la operación por la que se aseguran las pacas de diversos materiales mediante la utilización de film plástico.

Cross Wrap-D-2200 LW750

La línea envolvente Cross Wrap (CW) se puede transportar fácilmente como una sola unidad lista para su uso, así la envoltura puede comenzar inmediatamente, como se muestra en la Figura 5.55. La envoltura de pacas de residuos en origen proporciona una solución económica para el almacenamiento y el transporte de residuos.



Figura 5.55 Envolvente de película extensible Cross Wrap-D-2200 LW750
Fuente: (Adaptado de Crosswrap, 2015)

Características técnicas del equipo propuesto:

CAPACIDAD

Velocidad del ciclo de enfardado: 60 segundos por paca.

DIMENSIONES DE LAS BALAS ENFARDADAS

Ancho: 1.10 m.
Altura: 1.10 m.
Longitud: 1.4-2.0 m.

Peso máx.: 2000 kg.
Peso min: 250 kg.
Material de la paca: FIRSU.

FILM PARA ENFARDADO

Cross Wrap recomienda tramos de film de 750 mm de ancho, Ø 240 mm máx. y un peso máximo de 25 kg.

PROCESO

La línea de enfardado reconoce la bala cuando está aproximándose por la primera cinta transportadora después de la prensa.

La línea de enfardado mide la longitud de la bala y la envuelve automáticamente.

La bala terminada esperará hasta la llegada de la siguiente bala, hasta que salga de la mesa rotativa.

Cuando la bala ha sido enfardada será levantada de la cinta de almacenaje con una carretilla elevadora equipada con un sistema estilo pinza para coger las balas.

El ciclo de enfardado es aproximadamente de 60 segundos por bala cuando se utiliza 5 capas de film por bala. (no está incluido el tiempo de cambio del rodillo de film o el tiempo de inactividad).

SISTEMA ELÉCTRICO

Voltaje: 3 x 400 V.

Potencia total motor: 22 kW

Corriente suministrada: 63 A

Clase Protección: IP 54

Los equipos de enfardado CW son compatibles con todas las prensas de cámara cerrada HTR. En la Figura 5.56 se muestra una planta en cuya instalación se adaptó una prensa más una envolvente CW. Gracias a su estructura modular, las líneas de envoltura CW pueden envolver pacas de diversos tamaños y en el número que sea necesario.



Figura 5.56 Instalación compuesta por una empacadora de caja cerrada y envolvente CW
Fuente: (Adaptado de PAALGROUP, 2013)

En la Figura 5.57 se muestra un esquema del funcionamiento de un sistema de compactación y enfardado, en el cual se producen pacas por medio de una prensa de cámara cerrada, atadas con flejes de plástico y envueltas con plástico film por medio de una envolvente CW. Las pacas están almacenadas al aire libre a la espera de ser transportadas a la coprocesadora para su aprovechamiento como combustible alternativo o su disposición final en rellenos sanitarios secos.

Las pacas producidas tienen una gran uniformidad en sus dimensiones, lo cual facilita y optimiza el transporte hacia los lugares de destino. De esta manera se pueden colocar más toneladas por m² y reducir costos operativos en el transporte.

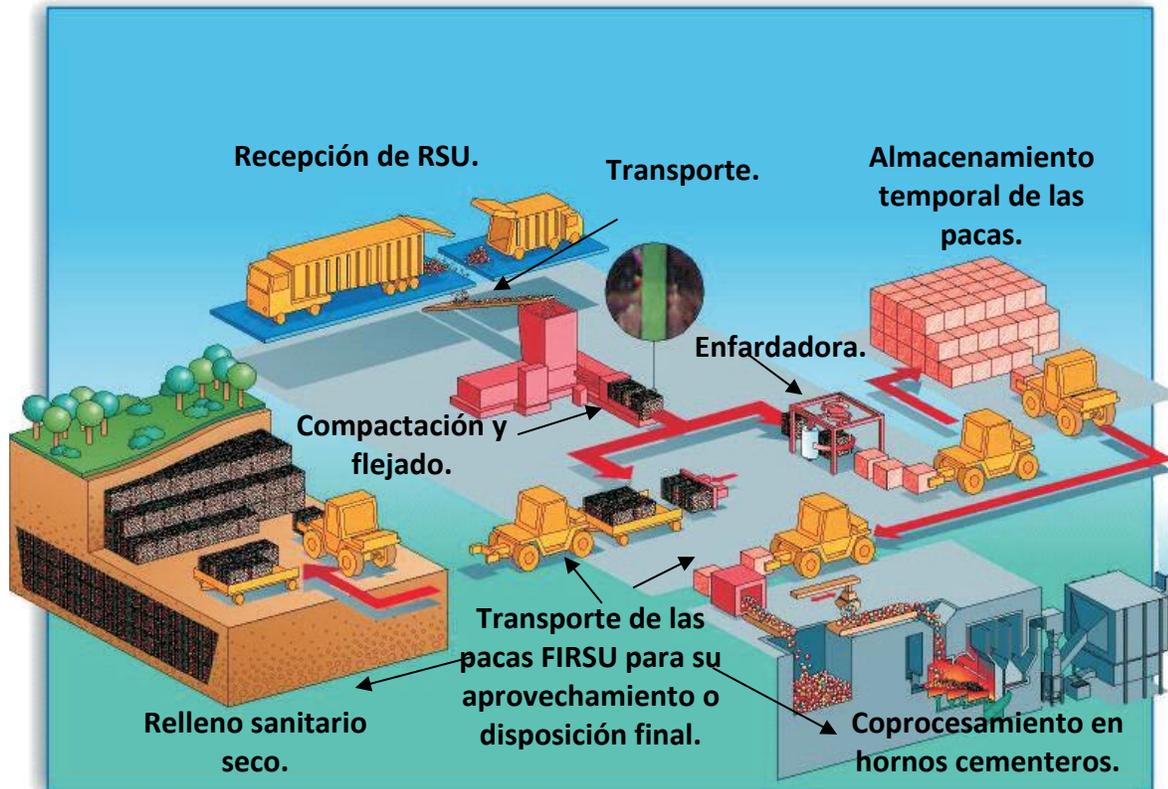


Figura 5.57 Esquema del funcionamiento de un sistema de compactación y enfardado
Fuente: (Adaptado de PAALGROUP, 2013)

5.6.3 Modelación y oferta económica de la infraestructura del CP-FIRSU

Los sistemas de proceso se deben diseñar para ser colocados en lugares estratégicos considerando principalmente aspectos ambientales, sociales y económicos. En la Figura 5.58 se presenta el diagrama de proceso que se propone para la operación del CP-FIRSU.

En la Figura 5.59 se muestra la modelación de la infraestructura propuesta del CP-FIRSU, para llevar a cabo el procesamiento de los RSU que se generan en el estado de Hidalgo. Primeramente los residuos son transportados de diferentes sitios de disposición o desde los centros de población a través de camiones recolectores, posteriormente son depositados en una fosa de recepción y se colocan en una tolva para ser transportados y procesados mediante dos líneas de selección a diferentes equipos de reducción, separación y compactación. El procesamiento inicia con una pre-trituración por equipos rompe bolsas, después mediante trommeles se separa la mezcla de materiales orgánicos fermentables y otra de combustibles alternativos, conocida como FIRSU, la cual se somete a una selección manual para separar los residuos reciclables (PET, cartón, vidrio, metal, piel, papel, madera, etc.), los cuales son separados y compactados para ser transportados a empresas de reciclaje o centros de acopio. Por otra parte la FIRSU remanente (rechazo), que ya no se puede reusar o reciclar se separa mediante separadores magnéticos los residuos ferrosos que todavía pudieran permanecer en la línea de selección de la FIRSU para evitar que ocasionen daños en el proceso de coprocesamiento en los hornos cementeros. Por último la FIRSU de rechazo se compacta y se envuelve con película de plástico extensible para formar pacas que optimicen su manejo y transporte a las cementeras.

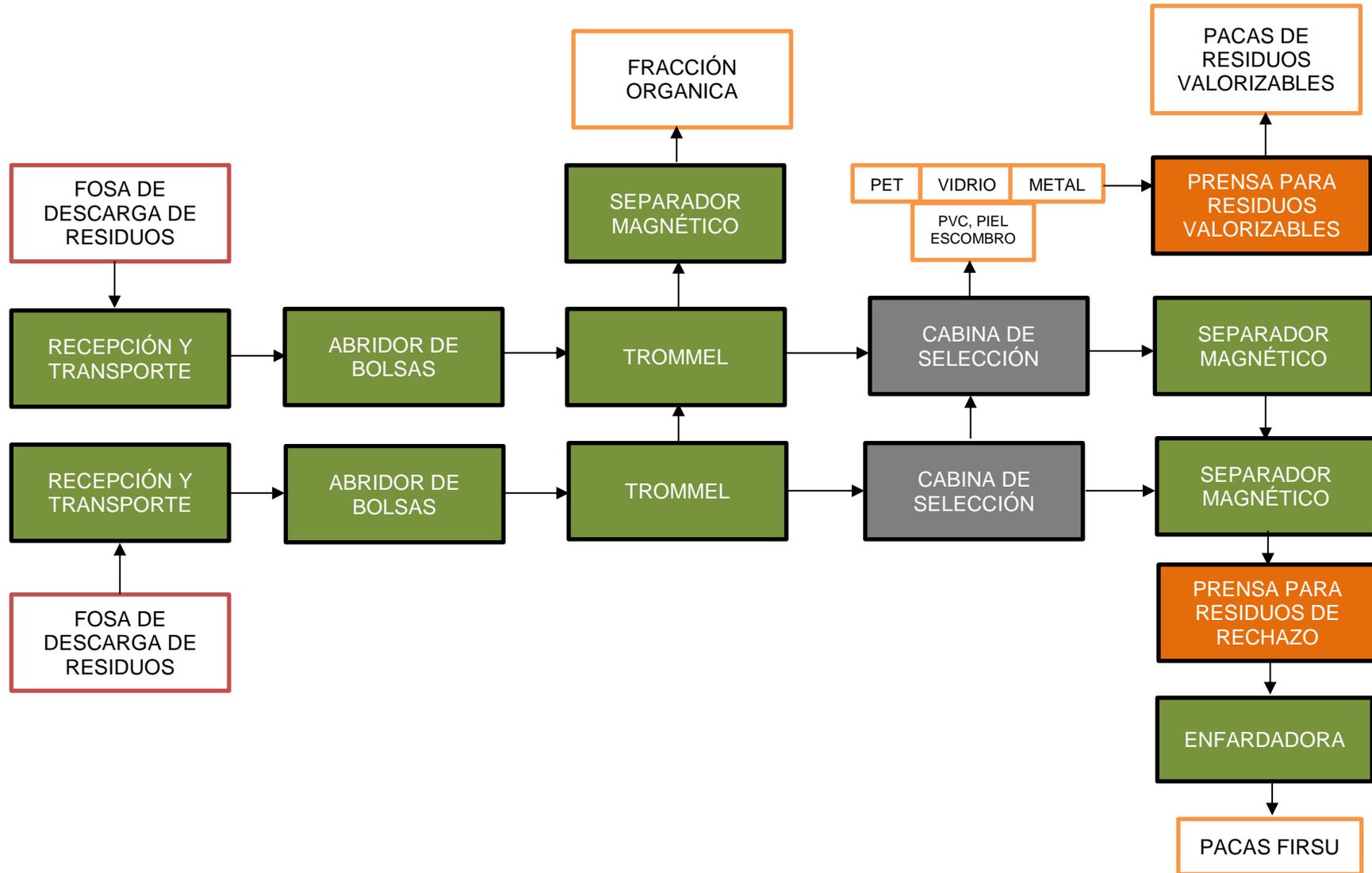


Figura 5.58 Diagrama de flujo de los procesos en el CP-FIRSU

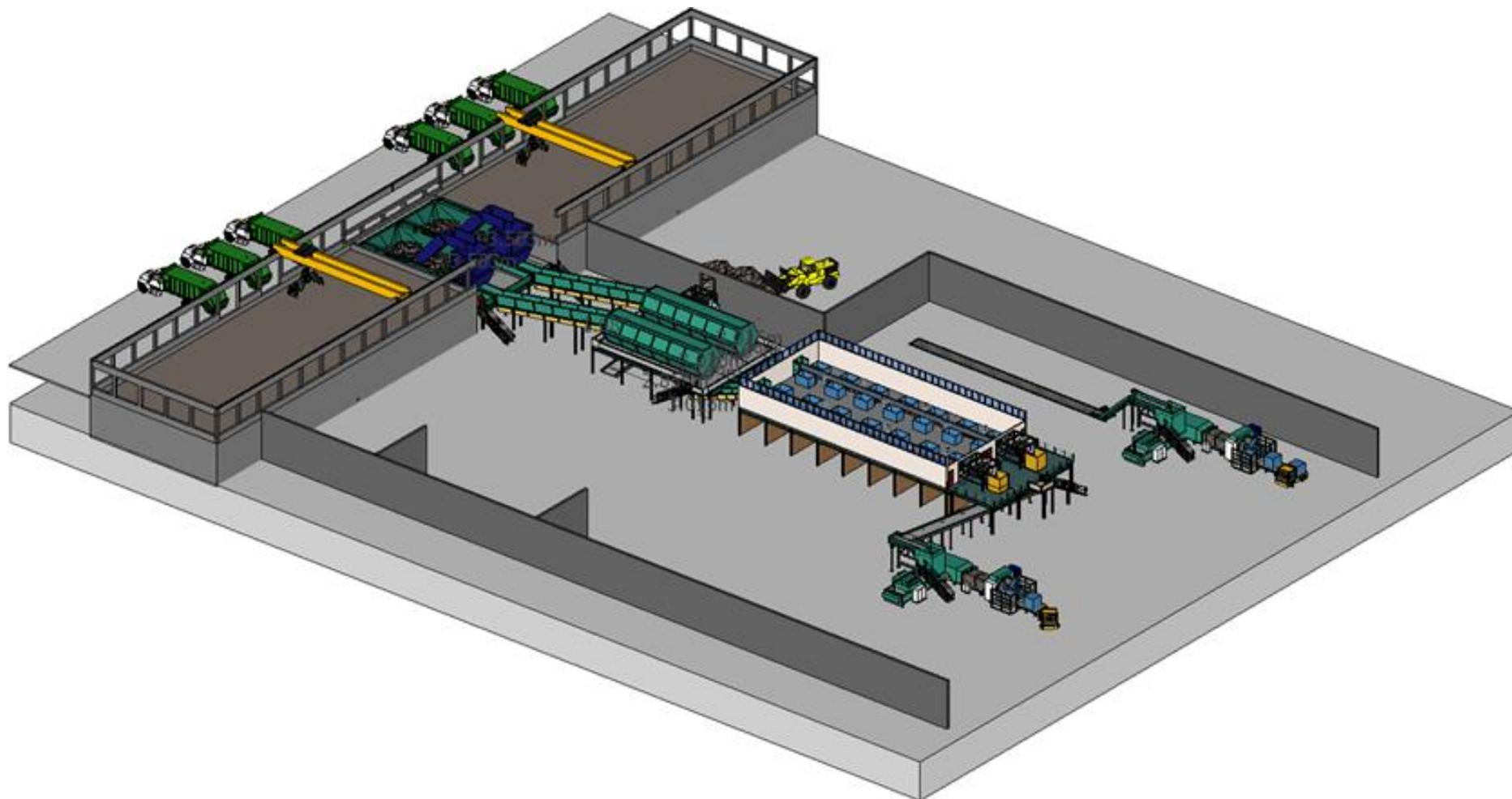


Figura 5.59 Modelación de la infraestructura del CP-FIRSU

Propuesta y revisión económica de los equipos que conformarán el CP-FIRSU

Se realizó la propuesta y revisión económica de los equipos con base a costos vigentes que oferta la empresa MASIAS Recycling de España a través de la empresa filial mexicana Grupo Transforma Ambiental (véase Tabla 5.13).

Tabla 5.13 Revisión económica de los equipos a implementar en el CP-FIRSU

PROPUESTA ECONOMICA INSTALACIÓN PARA EL CP-FIRSU EN EL ESTADO DE HIDALGO Oferta N°-P-15-260-01; Fecha: 28/10/15.			
ID	Descripción	Tipo	Precios
AL-101	TRANSP. ALIMENTACIÓN	PB 11/1600	75.625 €
TO-AL101	<i>Estructura Tolva</i>		52.465 €
SH-102	ABRIDOR DE BOLSAS	TM 5000 E	380.705 €
SH-102EST	<i>Estructura con pasarela</i>		23.890 €
CT-103	TRANSP. A TRÓMEL	UP 21/1600	45.945 €
TR-104	SEPARADOR TRÓMEL	TR2,5/12/14	191.115 €
CT-105	TRANSP. DE SELECCIÓN	PA 27/1200	38.185 €
PL-106	PLATAFORMA DE SELECCIÓN	PL 20,5/11/3,9	118.220 €
CA-107M	<i>Muretes de madera separación trojes</i>		Incluido
CA-107E	<i>Escaleras conexión equipos</i>		Incluido
CA-107P	<i>Puertas manuales de los trojes</i>		Excluido
CA-107	CABINA DE SELECCIÓN	CA 20,5/11/3,1	45.450 €
CA-107CL	<i>Climatización</i>	699 m3	58.885 €
SM-108	SEPARADOR MAGNÉTICO	R SKM12.13	30.635 €
SM-108EST	<i>Estructura y tolvas separador electromagnético</i>		23.335 €
CT-109	TRANSP. INCLIANDO RECHAZO	PA 17/1200	26.755 €
CT-110	TRANSP. REVERSIBLE BY-PASS	PA 7/1200	17.080 €
PR-111	PRENSA PARA RECHAZO	HTR 425/3x55	576.135 €
RE-112	RETRACTILADO PARA BALAS	CW-D-2200	204.150 €
AL-101B	TRANSP. ALIMENTACIÓN	PB 11/1600	75.625 €
TO-AL101B	<i>Estructura Tolva</i>		52.465 €
SH-102B	ABRIDOR DE BOLSAS	TM 5000 E	380.705 €
SH-102BEST	<i>Estructura con pasarela</i>		23.890 €
CT-103B	TRANSP. A TRÓMEL	UP 21/1600	45.945 €
TR-104B	SEPARADOR TRÓMEL	TR2,5/12/14	191.115 €
CT-105B	TRANSP. DE SELECCIÓN	PA 27/1200	38.185 €
SM-106B	SEPARADOR MAGNÉTICO	R SKM12.13	30.635 €
SM-106BEST	<i>Estructura y tolvas separador electromagnético</i>		23.335 €
CT-201	TRANSP. INFERIOR TRÓMEL	UP 13/1200	31.050 €

Tabla 5.13 Revisión económica de los equipos a implementar en el CP-FIRSU (continuación)

CT-202 CT-203 SM-204	TRANSP. INFERIOR TRÓMEL TRANSP. FR. ORGÁNICA SEPARADOR MAGNÉTICO	UP 13/1200 UP 18/1400 R SKM10.14	31.050 € 38.725 € 27.655 €
SM- 204EST	<i>Estructura y tolvas separador electromagnético</i>		23.335 €
	Subtotal		2.922.290 €
MM	Montaje mecánico		226.255 €
EPM	Ensayos de puesta en marcha (en continuo)	(PMV 10d, PMC 10d)	27.090 €
IDPM	Ingeniería, documentación y Project Manager		73.056 €
GR	Grúas (descarga y montaje)		40.775 €
TR	Posición (según Incoterms 2010)	FCA Celrà (Spain)	16.565 €
IE	Instalación eléctrica, cableado y cuadro eléctrico (**)		160.000 €
	Total		3.466.031 €
	(**) Precio estimado		
Precio estimado total en pesos mexicanos:			\$ 71, 039, 199 MXN

La cantidad de RSU depositados actualmente en los rellenos sanitarios en Hidalgo es de aproximadamente 1,100 t/día y la proyección de generación de los residuos a 20 años realizada resulto ser de 1,799 t/día. Considerando un valor promedio de estos dos valores, más un margen de capacidad del 20%, se determinó que la capacidad mínima que debe tener el CP-FIRSU para asegurar su capacidad de recepción de residuos es de 1,800 t/día. Está contemplado para tener un periodo de diseño de 20 años, tomando en cuenta que no cambie y/o se modifique la reglamentación aplicable a dicho proyecto y/o se utilice una nueva tecnología que sea más rentable, lo que incrementaría su capacidad y el periodo de diseño del mismo. Se requerirá una superficie total de aproximadamente 1.50 ha para la instalación de su infraestructura, contemplando media hectárea más para el aprovechamiento de la fracción orgánica fermentable (método de compostaje), lo que nos da como resultado una superficie total requerida de 2 ha. El CP-FIRSU tendrá una capacidad de 100 t/h, tomando en cuenta las dos líneas de selección, da una capacidad total de 2,000 t/día. La operación de los equipos y el personal de trabajo será de 20 horas de trabajo al día divididas en dos turnos. El precio total estimado del montaje y puesta en marcha de cada uno de los equipos es de \$ 71, 039, 199 MXN. En el anexo A.4 se muestra el plano de la propuesta de diseño final para la operación del CP-FIRSU.

5.7 Análisis para determinar la ubicación del sitio factible para instalar el CP-FIRSU

5.7.1 Evaluación Multicriterio (EMC) en la selección de áreas factibles para ubicar el CP-FIRSU, empleando herramientas de SIG

En diversas zonas de la República Mexicana existen infraestructuras para la gestión de RSU; sin embargo, en su gran mayoría operan en condiciones inadecuadas, provocando riesgos a la salud y daños al ambiente, motivado esto por la falta de un marco jurídico y técnico adecuado en los estados de la república y en otras ocasiones su funcionamiento es ineficiente debido a que no se realizó una evaluación que permitiera determinar la ubicación factible en términos ambientales, técnicos y económicos.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que constituyen un importante elemento de apoyo en las tareas de generación de mapas, planificación ambiental y ordenamiento del territorio. Dichas herramientas son importantes pues además de permitir manipular variables ambientales y técnicas, incorporan procedimientos basados en los SIG con información georreferenciada, y la toma de decisiones se fortalece con la opinión y validación de expertos en el desarrollo y aplicación de la información por medio de diferentes técnicas (Olivas *et al.*, 2007).

La selección de áreas para la localización de infraestructura de selección y procesamiento de la FIRSU en Hidalgo y cualquier entidad del país, implica considerar además de la cercanía a los generadores, restricciones técnicas, jurídicas, ambientales, sociales, económicas y criterios climáticos, físicos, entre otros, que en su conjunto minimicen los riesgos sobre la salud humana de las comunidades aledañas y ecosistemas circundantes.

En el estado de Hidalgo, los municipios son los actores claves en la gestión de RSU, teniendo en cuenta que es en sus territorios donde se generan, almacenan, transportan, tratan y disponen finalmente estos residuos. Igualmente, al tener las autoridades de los municipios entre sus funciones el ordenamiento del territorio, son responsables de la localización de la infraestructura necesaria para la gestión de residuos, además de apoyar la aceptación social, imprescindible para validar la implementación de este tipo de proyectos.

Existen experiencias previas en México como en otras partes del mundo en las que se han empleado procedimientos con los SIG para lograr la ubicación de lugares destinados a la construcción de estaciones de transferencia (Araiza, 2014) y centros de aprovechamiento de residuos (Roé *et al.*, 2014); sin embargo, no se han empleado en la ubicación de sitios factibles para la instalación de un CP-FIRSU.

Para la evaluación de los criterios de localización, existen diversas metodologías, no solo para identificar áreas potenciales para el manejo de RSU, sino para la localización de otro tipo de infraestructuras como hidroeléctricas, puertos, carreteras, entre otros. Una de las metodologías mayormente empleadas, son las llamadas de Evaluación Multi-Criterio (EMC) que utilizan para su aplicación los SIG (Herrera, 2014). La EMC la conforma un conjunto de operaciones para la adopción de decisiones, considerando simultáneamente varios criterios o condicionantes. El método propuesto facilita el establecimiento de grados de adecuación y la ponderación diferencial de los criterios en la decisión final. La EMC en el entorno de un SIG implica utilizar datos geográficos, y la manipulación de la información de acuerdo con reglas de decisión definidas. Además se deben considerar indicadores vinculados con criterios ambientales y técnicos regulados por la normatividad (De Pietri *et al.*, 2011).

Para la aplicación de esta metodología, se requiere realizar una selección inicial de las zonas de mayor interés, descartando previamente las áreas que por disposiciones legales, técnicas o logísticas que se encuentren restringidas para soportar este tipo de infraestructura. Teniendo delimitada el área de estudio, se procede a evaluar la zona mediante la aplicación de variables ambientales, técnicas y socioeconómicas que permiten clasificar dentro de una macro zona, pequeñas áreas con aptitud alta para instalar el CP-FIRSU.

Así mismo llevar a cabo la localización de un CP-FIRSU es una tarea compleja en la que es necesario también tener en cuenta la eficiencia espacial, medido usualmente por la distancia existente entre estas instalaciones y la población y mediante el cual se pretende alejar lo máximo posible estas instalaciones de zonas habitadas. La consideración exclusiva de esta idea puede generar resultados convenientes desde otros puntos de vista, por ejemplo el de los potenciales usuarios de estas instalaciones, es decir, las plantas cementeras que tienen que transportar hasta ellas los combustibles alternos.

Descripción del área de estudio

El área de estudio del presente trabajo es la región sur del estado de Hidalgo (véase Figura 5.60), previamente se realizó la localización de los principales sitios de manejo de residuos así como de las plantas cementeras, se determinó que todos se encuentran en la región sur del estado, con base en esto se delimito el área de estudio. La entidad hidalguense se ubica en la porción del altiplano central del país, a tan sólo 65 km al noreste del núcleo poblacional y económico más importante de la República Mexicana: la Ciudad de México, cubriendo una superficie cercana a los 21,000 km², los cuales representan 1.10% del territorio nacional (INEGI, 2013).

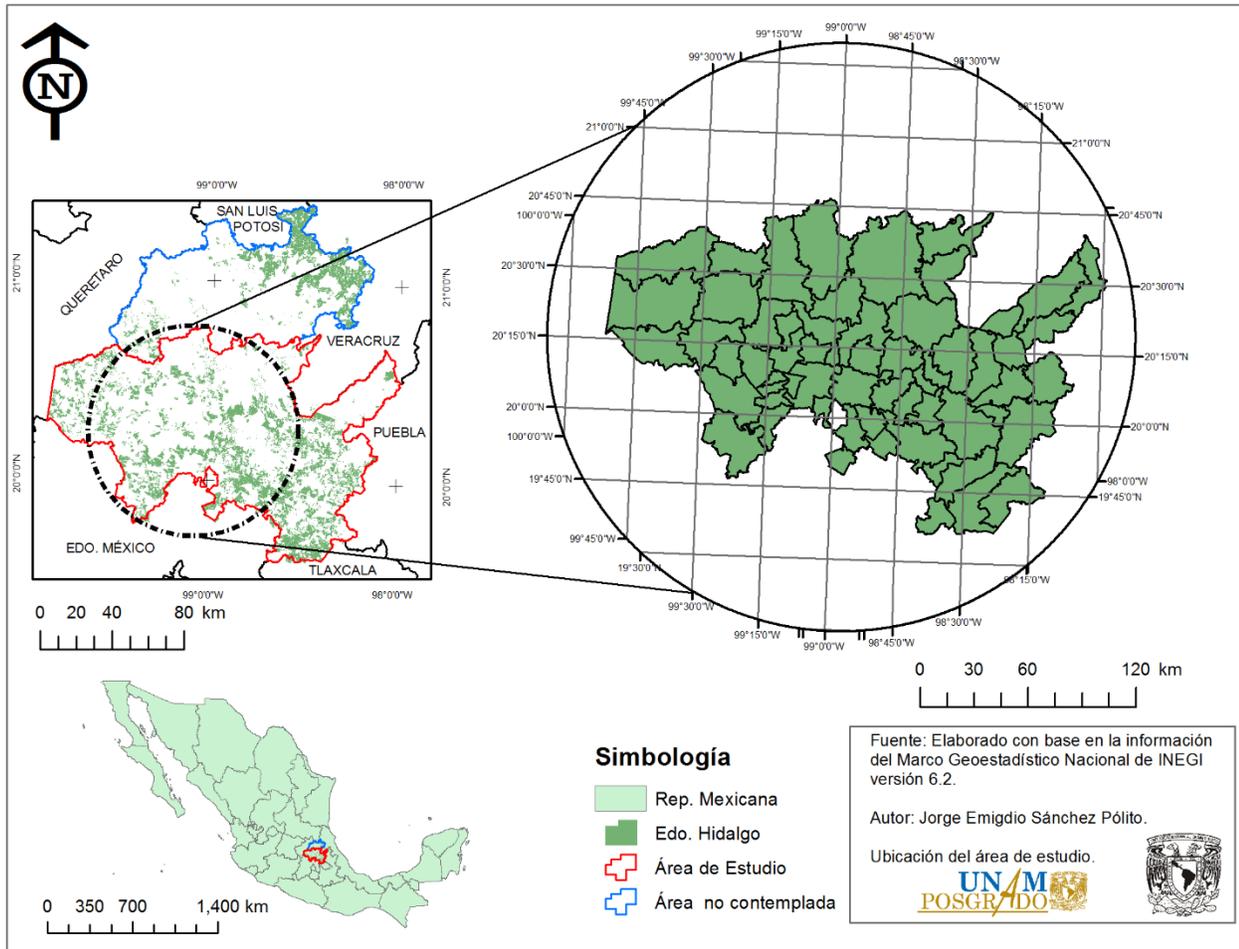


Figura 5.60 Área de estudio, región sur del estado de Hidalgo
Fuente: (Elaboración propia a partir de INEGI, 2014m)

Las actividades primarias en la región sur de Hidalgo principalmente son la minería con la extracción de diversos minerales, aunque la agricultura y la ganadería actualmente comienzan a ganar terreno, así mismo se caracteriza por su importante actividad industrial, entre las principales industrias de transformación y manufactureras destacan: la siderúrgica, textil, calzado y las cementeras. La fisiografía es base de llanuras y lomeríos, el clima es principalmente semiseco templado y templado subhúmedo con lluvias en verano, y las temperaturas predominantes van de los 14 a 18 °C (INEGI, 2013).

Un dato de sumo interés es que los municipios que forman parte del área de estudio delimitada se caracterizan por tener el mayor número de comunidades urbanas y de habitantes (Pachuca de Soto, Tulancingo de bravo, Mineral de Reforma, Tula de Allende, Tizayuca, Ixmiquilpan, Tepeji del Río de Ocampo, Cuautepéc de Hinojosa y Actopan), así como la mayor generación de residuos.

En cuanto a la composición de los residuos, se asume de acuerdo a la conformación eminente urbana del área de estudio y de los reportes de diversas instituciones (INEGI, SEMARNAT) indican que los RSU son en su mayor parte de tipo inorgánico. Bajo este contexto se propone que la infraestructura a ubicar sea un CP-FIRSU que incorpore procedimientos de selección y valorización energética de RSU, destinando únicamente el rechazo a disposición final pero que este sea el mínimo. Es importante mencionar que el tipo de tecnología seleccionada es uno de los principales motivos de discusión en el presente trabajo, así como la ubicación óptima del CP-FIRSU.

Enfoque y desarrollo de la EMC a través de los SIG

El enfoque consistió en la aplicación de una de las técnicas de EMC de mayor estudio, denominada “Proceso de Análisis Jerárquico” (PAJ). Para determinar un conjunto de áreas preliminares aptas en donde se pueda ubicar el CP-FIRSU. Se seleccionó esta técnica principalmente porque permite identificar las partes que conforman el sistema así como sus vínculos, reconoce el peso de cada una de las partes y propone una solución racional.

Satty creador de la técnica, indica que el PAJ consiste en dividir un problema o situación compleja en sus partes o variables que la componen, realizando un arreglo en orden jerárquico, para después asignarles valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada parte o variable, con el fin de sintetizarlos para determinar cuáles tienen la mayor prioridad. Cabe recalcar que al dividir a la situación o problema en partes o variables, la persona que evalúa puede centrarse en conjuntos más pequeños de decisiones (Satty, 1980).

El proceso desarrollado por Saaty (1980) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio.

El esquema jerárquico consta usualmente de tres niveles básicos: meta final, criterios de decisión (acompañada de sub-criterios usualmente), y alternativas de solución. Su fórmula matemática se representa en la ecuación 5.2.

$$R_i = \sum_k w_k r_{ik} \quad (5.2)$$

Dónde “ W_k ” es el vector de prioridades (pesos) asociado a cada elemento “ k ” de la estructura jerárquica de criterios. La suma “ W_k ” es igual a 1 y “ r_{ik} ” es el vector de prioridades obtenido al comparar las alternativas con cada criterio.

Criterios de localización: factores y limitantes

Antes de llevar a cabo la aplicación de cualquier técnica EMC en el entorno de un SIG, es importante establecer los criterios que incidirán la capacidad de recepción del territorio (Gómez y Barredo, 2005). Los criterios de localización (criterios generales) utilizados en el presente trabajo fueron divididos en tres: ambiental, socioeconómico y técnico (véase Figura 5.61).

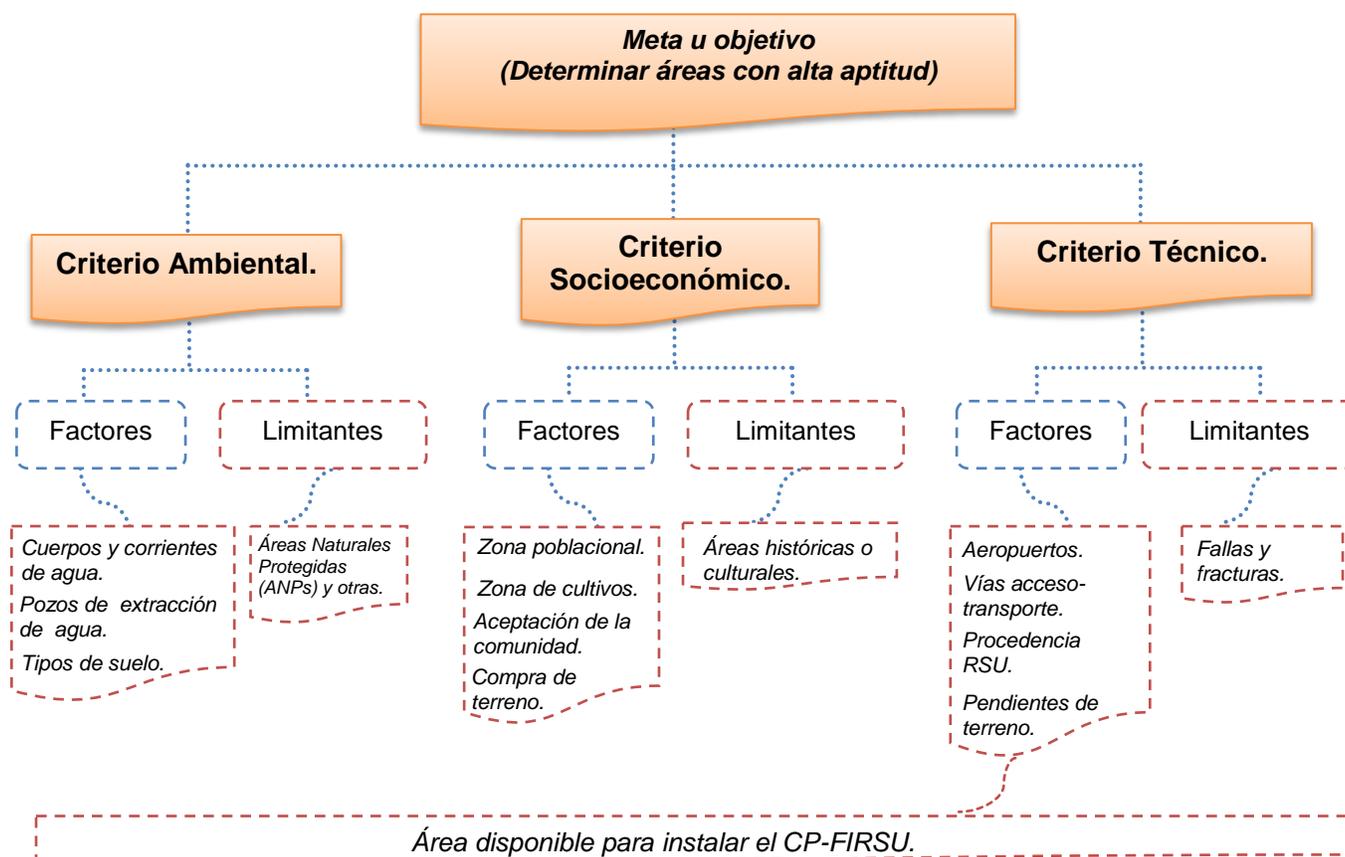


Figura 5.61 Diagrama general de la EMC

A su vez los denominados criterios generales fueron fraccionados en sub-criterios (criterios específicos) y acomodados en dos vertientes: “factores y limitantes”, siendo los “factores” aquel tipo de variable que debe de tener más de dos categorías o niveles, mientras que los “limitantes” solo pueden tener como máximo dos.

Es de destacar que los criterios ambientales surgen de la aplicación de la normatividad en materia de manejo de RSU, de acuerdo a lo mencionado en la “NOM-083-SEMARNAT-2003” SEMARNAT (2003), específicamente en su apartado 6.1.

Por su parte los criterios técnicos y socioeconómicos constituyen un paso necesario y consecutivo a los criterios ambientales, debido a que están directamente relacionados con el funcionamiento y operación de la infraestructura, así como con la afectación al ser humano y no sobre la afectación al medio ambiente.

Ponderación y normalización de criterios

Para realizar la ponderación de los criterios generales y específicos (Pcg y Pce) se empleó la comparación por pares desarrollada por Satty (1980), a la cual se le hizo una modificación para no emplear directamente la escala de importancia relativa con valores de 1 a 9, sino más bien una escala porcentual, quedando los valores tal y como se aprecia en la Tabla 5.14.

Para la normalización de los niveles en los criterios específicos, se aplicó una ponderación simple de valores que va de 1 a 3 para los factores y de 0 y 1 para los limitantes; en donde los valores más pequeños equivalen a la condición más desfavorable o limitante, mientras que los valores más altos equivalen a la condición más favorable.

La información a detalle sobre los criterios y sub-criterios se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Ponderación y normalización de criterios generales y específicos

Criterio general	Pcg	Criterio específico	Pce	Descripción	Nn	
Ambiental	0.35	<i>Cuerpos y corrientes de agua.*</i>	0.25	Los cuerpos y corrientes de agua superficiales y sobretodo de caudal continuo, deben estar a cuando menos a 500 m de toda ubicación de infraestructura de manejo de RSU.	> 1000 m	3
					500 - 1000 m	2
					< 500 m	1
		<i>Pozos de extracción de agua.*</i>	0.25	Los aprovechamientos de agua subterráneos de uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados deben encontrarse a una distancia no menor de 500 m. de la posible ubicación de toda ubicación de infraestructura de manejo de RSU.	> 1000 m	3
					500 - 1000 m	2
					< 500 m	1
		<i>Tipos de suelo.*</i>	0.25	La permeabilidad de un suelo determina el grado de contaminación que puede causar a una infraestructura de manejo de RSU al penetrar en éste los lixiviados y demás desechos líquidos. En este sentido, se preferirá sitios con suelos sedimentarios con características areno-arcillosas ya que son los más recomendables debido a su baja permeabilidad.	Permeabilidad lenta	3
					Permeabilidad moderada	2
					Permeabilidad rápida	1
		<i>ANPs y otros.*</i>	0.25	La infraestructura de manejo de RSU no deberá ubicarse dentro de zonas con presencia de áreas naturales protegidas, marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales u otras áreas de importancia natural. Para construir esta capa se empleó la cartografía publicada por CONANP (2014).	Fuera de zonas	1
Dentro de zonas	0					
		<i>Zonas poblacionales.**</i>	0.20	El CP-FIRSU podrá ubicarse en predios localizados fuera de la traza urbana y a una distancia mínima de 500 m de la población. Dentro de la traza urbana, sólo podrán ubicarse en zonas o parques industriales.	> 1000 m	3
					500 - 1000 m	2
					< 500 m	1
		<i>Zonas de cultivo.****</i>	0.20	Las zonas sensibles de agricultura corresponden a áreas donde se practica el cultivo extensivo, en este sentido, se preferirán predios donde el uso de suelo sea aplicable para la instalación del CP-FIRSU.	Uso de suelo	3
					condicionada	2
					No aplica su uso	1

Tabla 5.14 Ponderación y normalización de criterios generales y específicos (continuación)

Socio económico	0.40	<i>Aceptación comunal. ****</i>	0.20	Estos criterios se refieren a la facilidad de adquirir el terreno que se intentará utilizar para emplazar el CP-FIRSU, tanto desde el punto de vista social y económico. Para construir la capa de factibilidad de compra de terrenos, se emplearon los datos publicados en RAN (2014), específicamente las capas de "Tierras de uso común y Tierras parcelarias". Por otro lado, la capa de aceptación comunal se construyó a partir de información relacionada al manejo de los RSU y del beneficio de no disponer sus residuos en SDF que pudieran afectar a la salud y al medio donde se desarrollan los habitantes de las localidades cercanas a los SDF.	Aceptación alta	3	
					Aceptación media	2	
					Aceptación baja	1	
		<i>Factibilidad de compra terreno. ****</i>	0.20			Adquirible	3
						Medianamente adquirible	2
						Difícilmente adquirible	1
		<i>Acceso a comercios e industria (recicladoras, cementeras y plantas de compostaje). ****</i>	0.20			< 5 km	3
						5 - 15 km	2
						> 15 km	1

Tabla 5.14 Ponderación y normalización de criterios generales y específicos (continuación)

Técnico	0.25	Vías acceso-transporte. ***	0.20	Las vías de acceso son muy importantes en la selección del sitio para ubicar el CP-FIRSU. Si no existen vías de acceso y se deben construir, esto aumentará considerablemente los costos de inversión, por lo que siempre será preferible seleccionar un lugar que tenga acceso, pequeños tramos de conexión o esté muy cercano a carreteras transitables. El CP-FIRSU podrá ubicarse dentro de la zona urbana, en vialidades con ancho de 12 metros y pavimentos que resistan el paso de vehículos pesados.	< 1 km	3
					1 - 2 km	2
					> 2 km	1
		Procedencia de RSU. ****	0.20	El CP-FIRSU siempre será mejor tenerlo ubicado a la menor distancia del lugar donde se generan los residuos, porque en caso contrario se corre el riesgo de aumentar los costos de transporte, de igual manera de los SDF como son rellenos sanitarios municipales y regionales.	0 - 15 km	3
					15 - 30 km	2
					> 30 km	1
		Pendientes de terreno. ****	0.20	La topografía del terreno tiene influencia sobre la extensión vertical del cuerpo de los residuos, la estabilidad de los mismos y la evacuación de las aguas lixiviadas con pendiente natural. Es también un factor económico, pues determina la cantidad de excavación y nivelación del terreno que se debe hacer. Siempre se buscará aquel terreno con poca pendiente.	1 - 5%	3
					5 - 15%	2
					> 15%	1
	Fallas y fracturas. ****	0.20	El CP-FIRSU no deberá ubicarse dentro o muy cerca de fallas y fracturas que pudieran comprometer la estabilidad del sitio. Para este caso se ha considerado un buffer de 100 m.	Fuera de fallas/fracturas	1	
				Dentro o cercano a falla/fractura	0	
	Aeropuertos. *	0.20	Considerando que el CP-FIRSU es una instalación de manejo de residuos, pero no un SDF donde los residuos son dispuestos al cielo abierto y existen diversas aves que pudieran causar problemas o accidentes en las zonas de aterrizajes de los aviones, se consideró disminuir la distancia al centro de las pistas de aterrizaje de aeropuertos de lo que marca la normativa. En Hidalgo solo se tiene un aeropuerto localizado en la ciudad de Pachuca.	> 13 km	3	
				7-13 km	2	
< 7 km				1		
N/A	Área disponible. ****	N/A	Este criterio es de suma importancia y está relacionado con la cantidad de residuos que podrán procesarse en el CP-FIRSU para un determinado periodo de tiempo, a fin de maximizar las inversiones y esfuerzos que se hacen para la adquisición y la preparación del lugar de procesamiento. Es un criterio que no se consideró en la EMC debido a que depende de factores como la cantidad de residuos que recibirá el centro de procesamiento respecto a sus capacidades (dimensiones). Siempre se buscará un terreno con la capacidad de ubicar infraestructura para recibir residuos por 20 años o más, considerando el crecimiento poblacional.	Áreas < 1 Ha.	N/A	
		Áreas > 1 Ha.				

Pcg= Ponderación de criterio general; Pce= Ponderación de criterio específico;
Nn= Normalización de los niveles

* *Criterio tomado con base a la NOM-083-SEMARNAT-2003.*

** *Criterio tomado con base a la NTEA-013-SMA-RS-2011.*

*** *Criterio tomado con base al manual técnico de la SEMARNAT-2010.*

**** *Criterio tomado con base a otros trabajos de investigación y criterio personal.*

Respecto a la Tabla 5.14 en los criterios ambientales y socioeconómicos se consideró que en el sitio no existieran zonas arqueológicas, traza urbana, ni reservas ecológicas y que la distancia de centros de población mayores a 2,500 habitantes, zonas de inundación, pozos de agua, acuíferos, líneas de conductos de combustible, sustancias peligrosas y cuerpos de agua superficiales, fuera mínimo de 500 metros o más. Entre los criterios técnicos se tomaron en cuenta vialidades, servicios públicos, zonas de cultivo y topografía. En la topografía se consideró de manera importante que el terreno permitiera el acceso a los vehículos recolectores.

Una vez teniendo las matrices y valores, se procedió a correr el modelo en el entorno de un software de SIG, en este caso se empleó ArcGis 10.2.2, mediante el módulo de Spatial Analyst y la herramienta Raster Calculator o bien Weighted Overlay.

Es importante destacar con base a lo presentado en la Tabla 5.14 y Figura 5.63, que el criterio específico “área disponible” no fue considerado en la EMC inicial, sino más bien fue empleado como un último criterio determinante, pues una vez que se obtuvieron las áreas óptimas en base a todos los otros factores, únicamente se empleó al criterio “área disponible” para seleccionar a todos aquellos manchones o porciones del territorio que cumplieran con el área necesaria que se determinó en base a la capacidad de la infraestructura (tecnologías y equipos) para la instalación del CP-FIRSU.

Resultados y discusión

En la Figura 5.62 se muestran las características de cada capa geográfica que sirvió como insumo para desarrollar los mapas temáticos de cada uno de los sub-criterios.

En la Figura 5.63 se muestran los mapas temáticos de cada uno de los sub-criterios obtenidos a través del análisis de la información geográfica aplicada con base en la normativa, que fueron los que integraron el mapa final de la EMC.

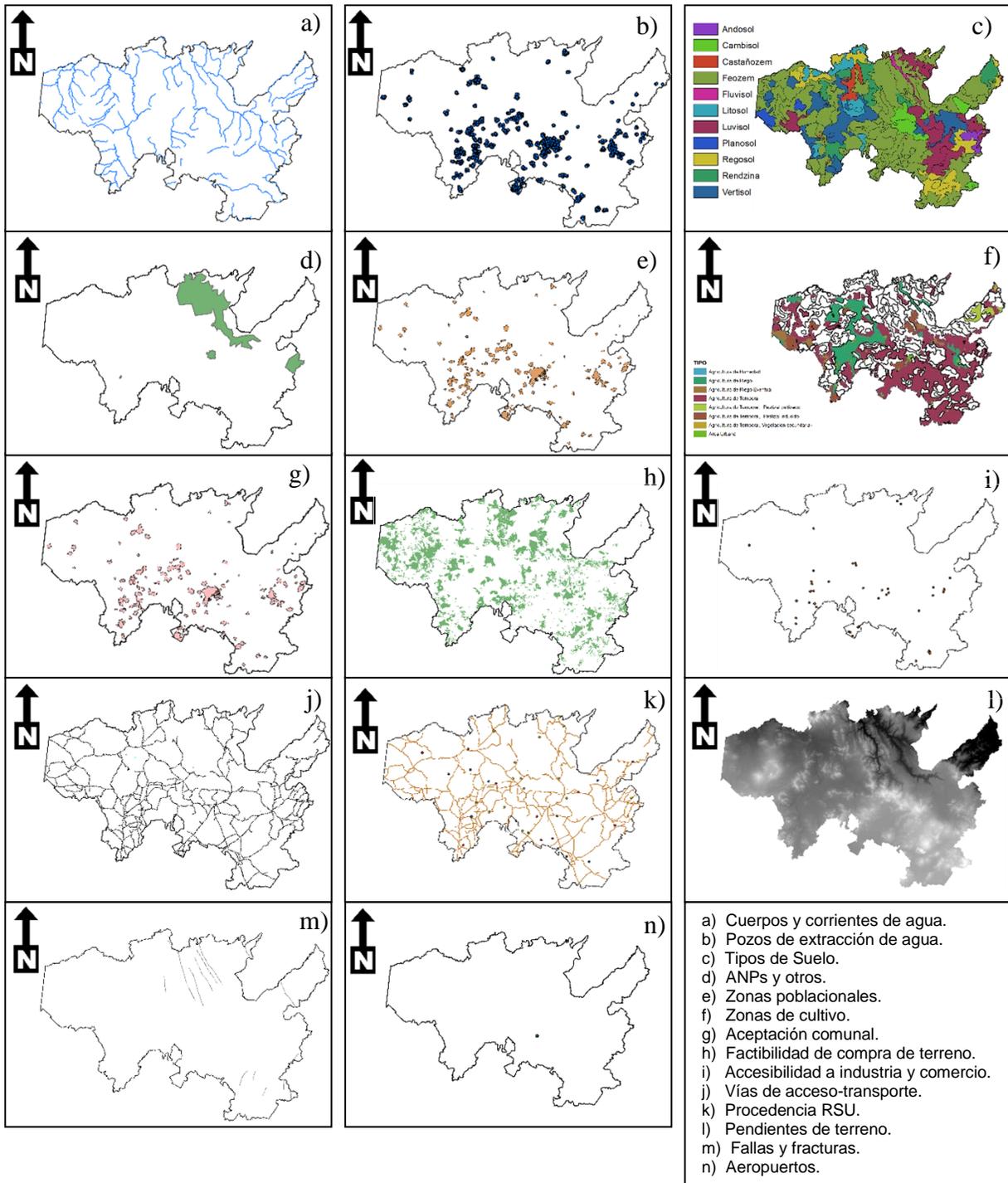


Figura 5.62 Insumos de las características geográficas para la elaboración de los mapas de la EMC

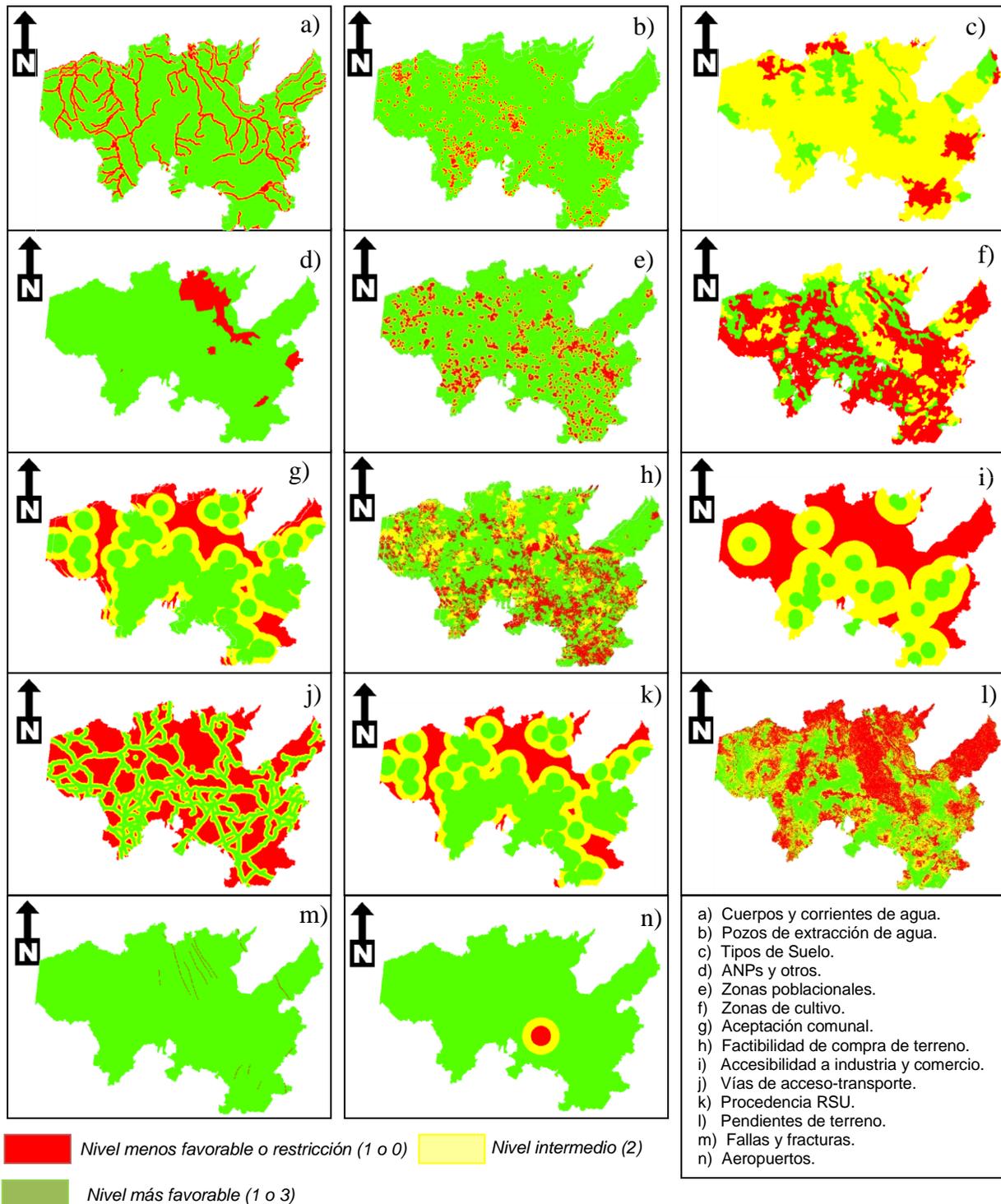


Figura 5.63 Mapas temáticos empleados en la EMC

En la Figura 5.64 se aprecia el resultado del mapa final del desarrollo de la EMC, obtenido mediante la sumatoria de los diversos mapas de cada uno de los criterios generales y específicos mostrando la zona de estudio clasificada en cuatro niveles, con base en el grado de aptitud para la ubicación factible el centro de procesamiento FIRSU. Se observa que predominan las áreas clasificadas como aptitud baja de 5,465 km² (color rojo) principalmente sobre el sureste y noroeste del territorio; en contraparte, 4,086 km² corresponden a áreas con aptitud media (color amarillo), y que tienen esta clasificación debido a encontrarse muy cerca de zonas con cuerpos de agua superficial zonas de cultivo y tipos de suelo. Por último una superficie de 3,122 km² de la zona de estudio tiene una aptitud alta (color verde), principalmente se concentran en un radio de entre 20 a 30 km en la parte norte y noroeste a partir del límite de la capital del estado (Pachuca, Hidalgo). Existen otras áreas más pequeñas con la misma categoría de aptitud, aunque deben ser analizadas de una manera más puntual para determinar una mejor viabilidad.

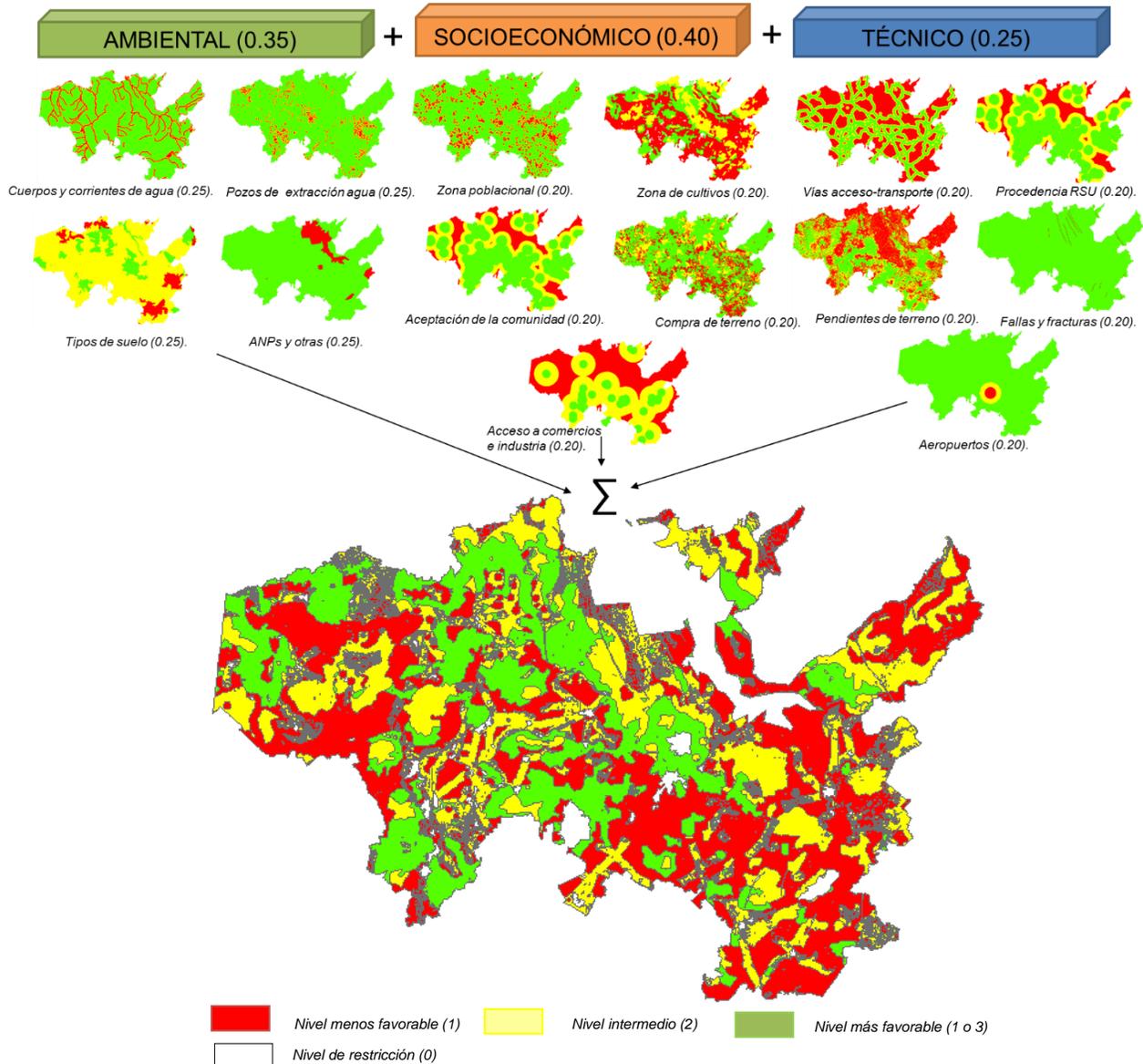


Figura 5.64 Mapa final obtenido en la EMC

Una atención especial merece la región no sombreada con ninguna tonalidad (nivel restrictivo) en la parte norte del área de estudio, la cual fue descartada de inmediato por la técnica de EMC, ya que corresponden a zonas de importancia natural y algunas más pequeñas donde se localizan considerables manchas urbanas de población.

5.7.2 Selección del sitio factible para la instalación del CP-FIRSU mediante un análisis origen-destino

El transporte de los RSU es uno de los aspectos más importante a considerar para analizar la factibilidad económica y la optimización en su gestión (recolección, transferencia, tratamiento y disposición final), en cualquier zona de estudio que se requiera emplazar infraestructura de gestión de RSU, es necesario realizar un análisis origen-destino que permita determinar la ruta factible para que el transporte genere un menor costo.

La planeación del transporte pretende dar un uso eficiente a la infraestructura vial y medios de transporte, de tal forma que se atiendan las necesidades de movilidad de la población; en esta planeación es importante prever los cambios que puedan darse por modificaciones en los sistemas de transporte. Las características socioeconómicas de una región son información valiosa para plantear escenarios en los sistemas de transporte.

Determinación de los sitios de ubicación factible del CP-FIRSU

Para desarrollar el análisis origen-destino primeramente se obtuvieron las coordenadas geográficas de las plantas cementeras y los principales sitios de disposición de RSU (rellenos sanitarios municipales y regionales) que se encuentran actualmente en operación en Hidalgo, empleando un GPS. Posteriormente se ubicaron 21 puntos de ubicación óptima preliminares con base en las áreas con una alta aptitud favorable determinadas por la EMC y empleando el software de SIG, ArcGis 10.2.2 (véase Figura 5.65). De estos 21 puntos se descartaron cinco debido a la lejanía de la red carretera lo cual implicaría un mayor costo de inversión en el camino de acceso para llegar al CP-FIRSU, quedando solo 16 puntos de ubicación factible.

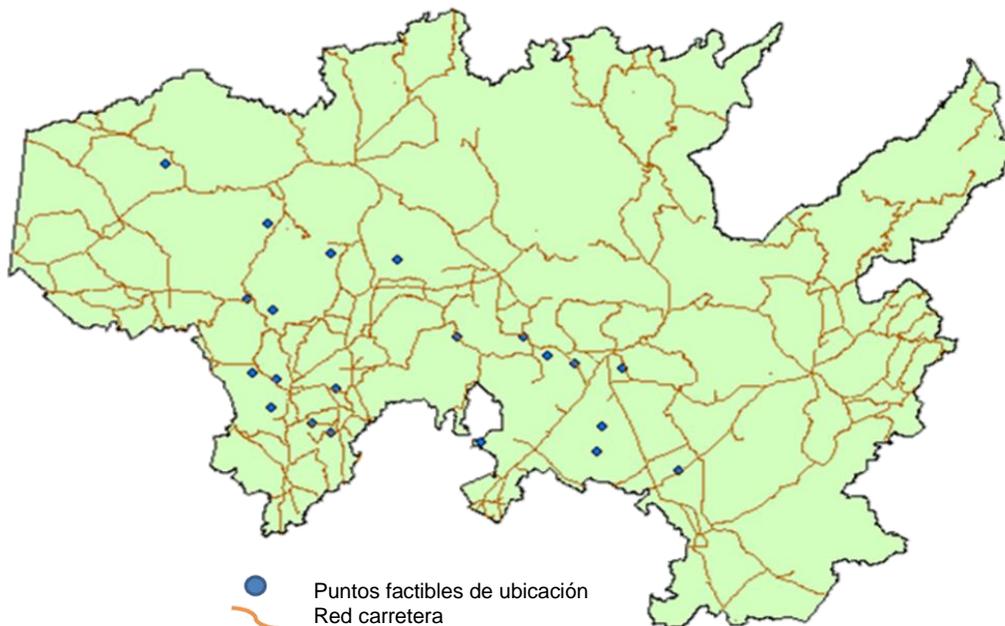


Figura 5.65 Puntos factibles de ubicación preliminares

Una vez teniendo ubicados los 16 puntos factibles, los sitios de manejo de RSU y las plantas cementeras, el análisis se dividió en dos fases. La primera consistió en medir cada una de las distancias y determinar la ruta más corta de los sitios de manejo de RSU (orígenes) a los puntos de ubicación factible (destinos). La segunda fase se efectuó de los puntos factibles (orígenes) a las plantas cementeras (destinos). Por último se multiplicaron las distancias por el costo (flete) del transporte de los residuos, siendo el mismo costo tanto en el transporte de residuos a granel como residuos procesados (pacas FIRSU). Es importante mencionar que la diferencia principal del transporte de los residuos radica que en un viaje con residuos compactados (pacas FIRSU) carga más material que un viaje de residuos a granel, por lo que es de esperar que el costo por kilogramo de residuos compactados sea menor. En anexos, en las Tablas A.3 y A.4 se muestra a detalle los resultados el análisis origen-destino.

Finalmente obtuvieron tres puntos factibles de ubicación para la instalación del CP-FIRSU, que se determinaron mediante el análisis origen-destino. El primero (punto 5) se ubica a las afueras de Pachuca en la región Este de la capital; el segundo (punto 8) se ubica en la parte Norte del Municipio de San Agustín Tlaxiaca, a las afueras de la localidad de San Juan Solís y el tercero (punto 16) se ubica al norte del municipio de Huichapan, en la región Oeste del estado de Hidalgo. En las Figuras 5.66, 5.67 y 5.68 se muestran la ubicación de los tres puntos determinados.

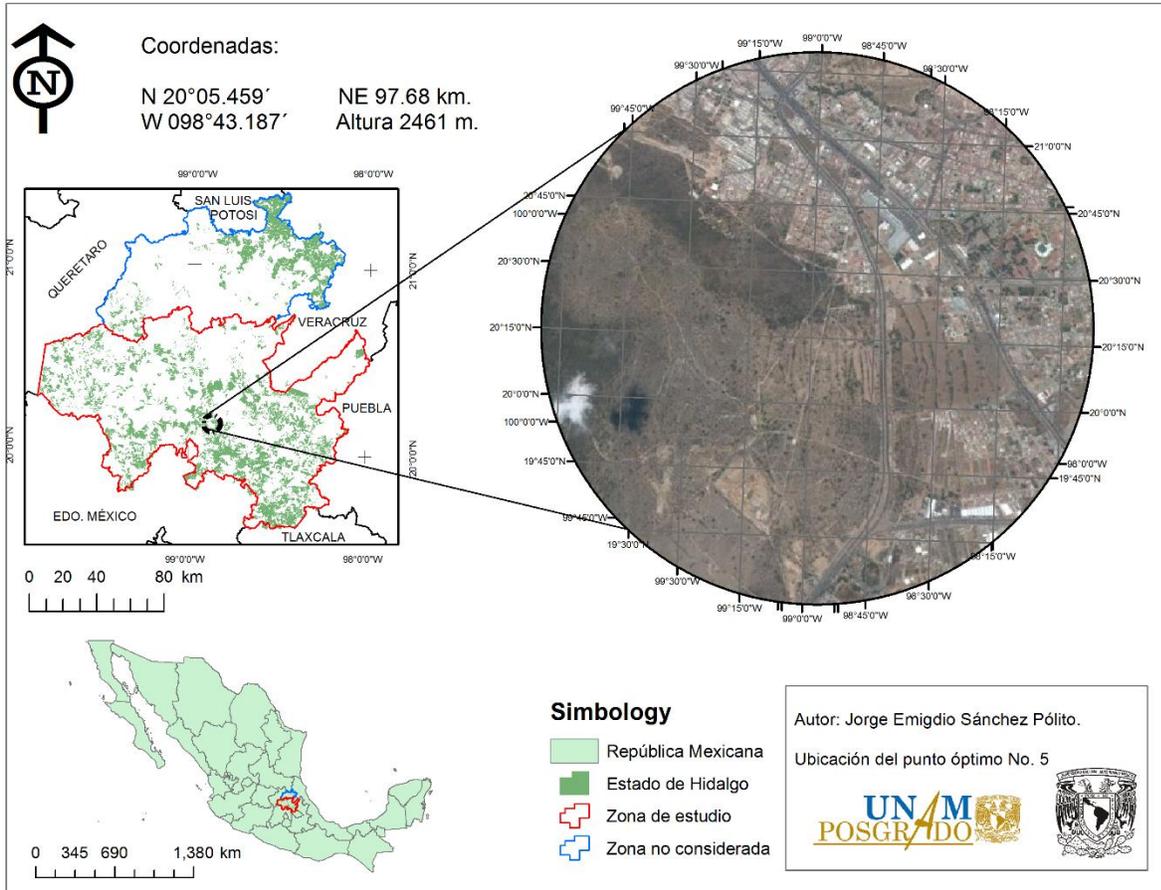


Figura 5.66 Ubicación del punto factible número 5

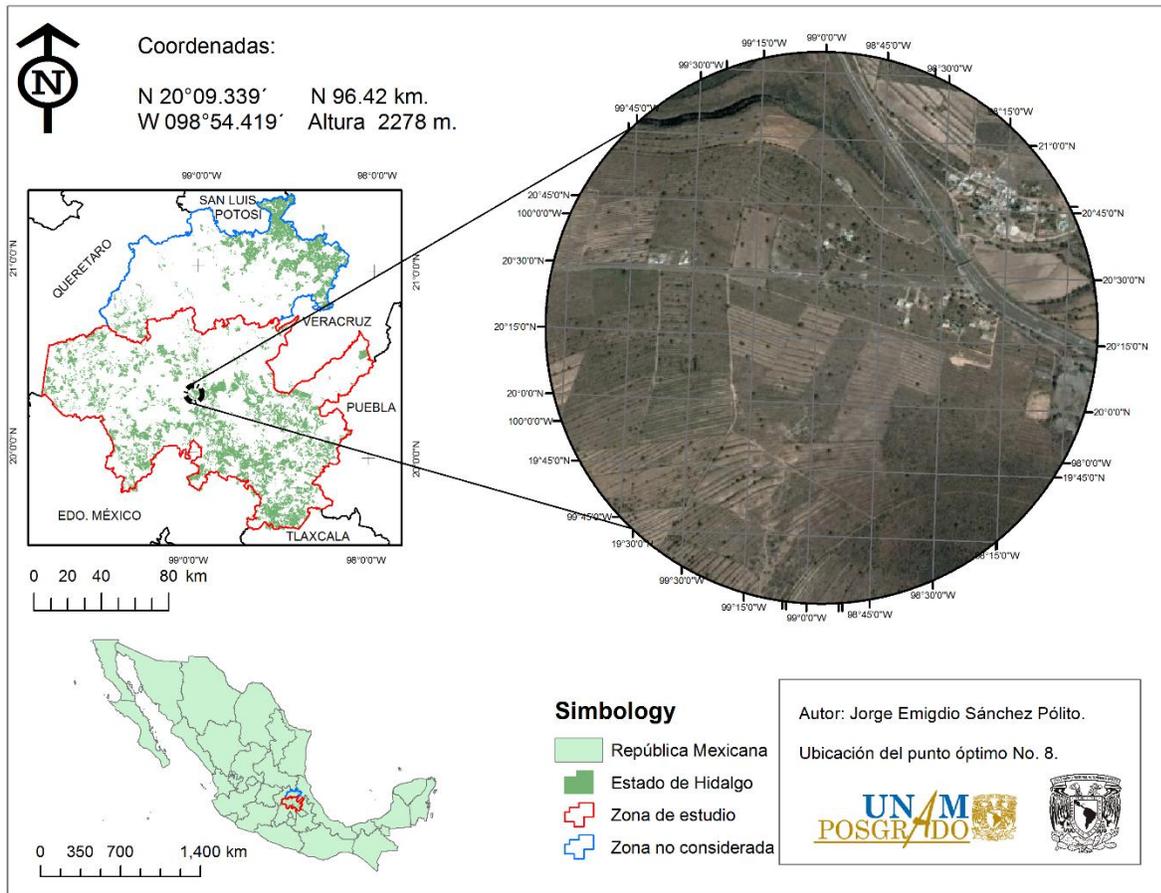


Figura 5.67 Ubicación del punto factible número 8

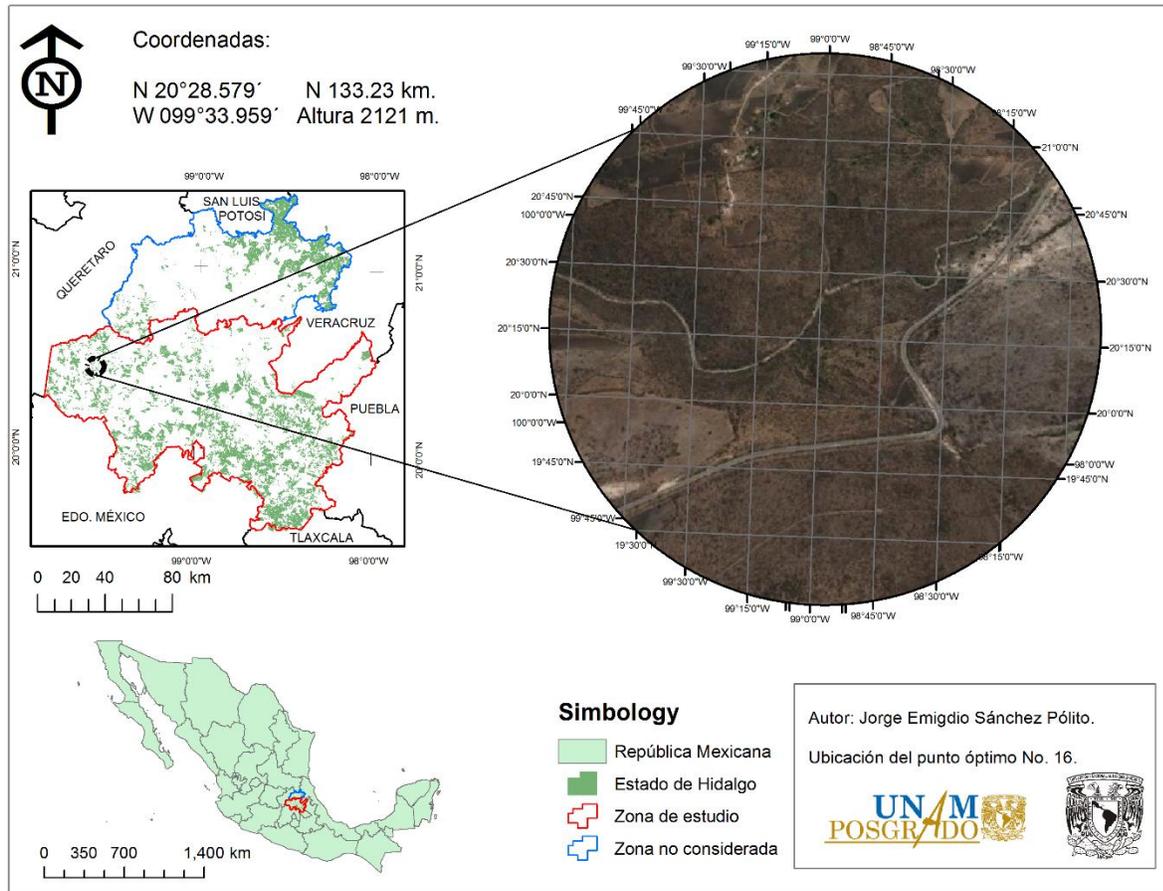


Figura 5.68 Ubicación del punto factible número 16

En promedio el costo del flete por el transporte de residuos es de \$47/km. A partir del importe del flete se determinó el costo total del transporte desde los sitios de disposición final de residuos a los tres puntos óptimos y de cada punto a las plantas cementeras. Para el punto 5 el costo total del transporte fue de \$77,767; para el punto 8 de \$76,160 y para el punto 16 de \$89,163.

Se realizó la validación *in situ* de los tres sitios de ubicación factible para analizar su viabilidad para instalar el CP-FIRSU, principalmente la condición general de los terrenos, zonas pobladas o instalaciones cercanas que pudieran dificultar su operación y la superficie con la que cuentan. En la Figura 5.69 se muestra el terreno del punto factible número 5. La superficie de este terreno es de aproximadamente 4 ha.



Figura 5.69 Terreno del punto factible número 5

En la Figura 5.70 se muestra el terreno del punto número ocho. La superficie del terreno es de aproximadamente de 6 ha.



Figura 5.70 Terreno del punto factible número 8

En la Figura 5.71 se muestra el terreno del punto factible número 16. La superficie del terreno es de aproximadamente 5 ha.



Figura 5.71 Terreno del punto factible número 16

En la siguiente Tabla 5.15 se muestra una comparativa de las ventajas y desventajas que se analizaron en los terrenos de los tres puntos factibles determinados con base en características técnicas y normativas.

Tabla 5.15 Ventajas y desventajas de los terrenos en los tres puntos factibles de ubicación

Punto de ubicación	Ventajas	Desventajas
5	Se ubica a más de 500 m de cuerpos y corrientes de agua superficiales.	El acceso vehicular es complicado debido a que la carretera frente al terreno es de alta velocidad y alto flujo vehicular lo que puede representar un problema para la entrada y salida de los camiones y vehículos recolectores al CP-FIRSU.
	Se ubica a más de 500 m de pozos de extracción de agua.	
	La permeabilidad del suelo es moderada.	En ciertas partes del terreno se observó que lo utilizan para cultivo lo cual representa una factibilidad de compra de difícil adquisición.
	Se ubica a más de 1000 m de zonas poblacionales.	
	La pendiente del terreno es de 1-5% y no presenta fallas o fracturas.	Está ubicado a 72 km de los sitios de manejo de RSU.
	El área de terreno disponible (4 ha) cumple con el área mínima que se requiere para la instalación del CP-FIRSU.	
8	Se ubica a más de 500 m de cuerpos y corrientes de agua superficiales.	Está ubicado a 61 km de las plantas cementeras.
	Se ubica a más de 500 m de pozos de extracción de agua.	
	La permeabilidad del suelo es lenta.	
	Se ubica a más de 1000 m de zonas poblacionales.	
	El uso de suelo es aplicable.	
	La pendiente del terreno es de 1-5% y no presenta fallas o fracturas.	
	La vía de transporte es de fácil acceso, debido a que es un camino poco transitado y con bajo aforo vehicular, su estado es adecuado.	
	El área de terreno disponible (6 ha) cumple con el área mínima que se requiere para la instalación del CP-FIRSU.	
	Es el punto que está ubicado a una menor distancia de los sitios de manejo de RSU (68 km) y es el que está más cerca de las ciudades de Pachuca y Mineral de Reforma las ciudades que generan la mayor cantidad de RSU, lo que implicaría un menor costo en su transporte.	

Tabla 5.15 Ventajas y desventajas de los terrenos en los tres puntos factibles de ubicación (continuación)

Punto de ubicación	Ventajas	Desventajas
16	Se ubica a más de 500 m de cuerpos y corrientes de agua superficiales.	La pendiente del terreno es de 5-15%. Está ubicado a 95 km de los sitios de manejo de RSU.
	Se ubica a más de 500 m de pozos de extracción de agua.	
	La permeabilidad del suelo es muy lenta (terreno rocoso).	
	Se ubica a más de 1000 m de zonas poblacionales.	
	El uso de suelo es aplicable y no presenta fallas o fracturas.	
	El camino de acceso está en excelentes condiciones debido a que cerca de éste, se ubica un banco de materiales de la empresa CEMEX.	
	Es el sitio que está ubicado a una menor distancia de las plantas cementeras (36 km), en particular de la planta cementera de CEMEX Huichapan, lo que implicaría un viaje más corto para el aprovechamiento de las pacas FIRSU.	
Se realizó una entrevista a la dueña del terreno, la cual relato que podía considerar venderlo, de acuerdo a la oferta que le propongán.		

Para evaluar la aceptación social para llevar a cabo la instalación del CP-FIRSU se realizaron encuestas a los habitantes que habitan cerca de la ubicación de los tres sitios factibles que se determinaron. El tamaño de la muestra no probabilística que se consideró en cada sitio fue de 40 personas, se tomaron en cuenta los siguientes criterios de selección:

- ❖ Se seleccionaron los habitantes que vivieran en las comunidades más cercanas a los sitios óptimos de ubicación a una distancia máxima de 5 km.
- ❖ No se tomó en cuenta un estrato socioeconómico en particular.
- ❖ Se consideraron solo las personas adultas (hombres y mujeres) para ser entrevistados.
- ❖ Se acudió a realizar las encuestas tanto en casas habitación como en sitios que fueran concurridos en cada comunidad.
- ❖ Las preguntas fueron elaboradas para que las personas entrevistadas comprendieran más fácil el proyecto del CP-FIRSU, principalmente los beneficios que generaría y si aceptarían su instalación.

En la Tabla 5.16 se muestra un ejemplo del formato de las encuestas aplicadas en cada uno de los puntos factibles.

Tabla 5.16 Encuesta aplicadas para evaluar la aceptación social en los tres puntos factibles

PUNTO DE UBICACIÓN ÓPTIMO	5	8	X
NOMBRE DE PERSONA ENTREVISTADA:	Erika Mejía Segovia 28		
A QUE SE DEDICA:	Maestra de Bachillerato		
DE DONDE ES ORIGINARI@:	Dantzibojay, Hidalgo		

Encuesta para evaluar la aceptación social para la instalación de un CP-FIRSU en un radio de 500-1000 metros a partir de los puntos óptimos de ubicación determinados en el estado de Hidalgo.

	Alta	Media	Baja
1 ¿La importancia que se le debe de dar al manejo de los residuos es?	X		
2 ¿La afectación ocasionada por el manejo inadecuado de residuos en su vida diaria es?		X	
3 ¿El interés en separar los residuos en su hogar es?		X	
4 ¿La importancia de la separación y el reciclaje de residuos en su comunidad para disminuir la contaminación es?			X

	Mucha (1.0-1.50)	Poca (0.5-1.0)	Casi nada (0-0.5)
5 ¿Qué cantidad de residuos genera al día?	X		
6 ¿Qué cantidad de estos residuos separa o recicla?		X	

	SI	NO
7 ¿Considera interesante saber qué pasa con sus residuos después de que los recolecta el camión?	X	
8 ¿Cree que es importante mejorar el manejo de los residuos en su comunidad?	X	
9 ¿Aceptaría la instalación de una planta de reciclaje que implemente el aprovechamiento de los residuos que se generan en Hidalgo para evitar que se depositen en rellenos sanitarios o basureros?	X	
10 ¿Cree que si se llevará a cabo la instalación de la planta de reciclaje le aportaría beneficios ambientales, sociales y económicos?	X	

En las Figuras 5.72, 5.73 y 5.74 se muestran los resultados de las encuestas realizadas en el punto óptimo 5.

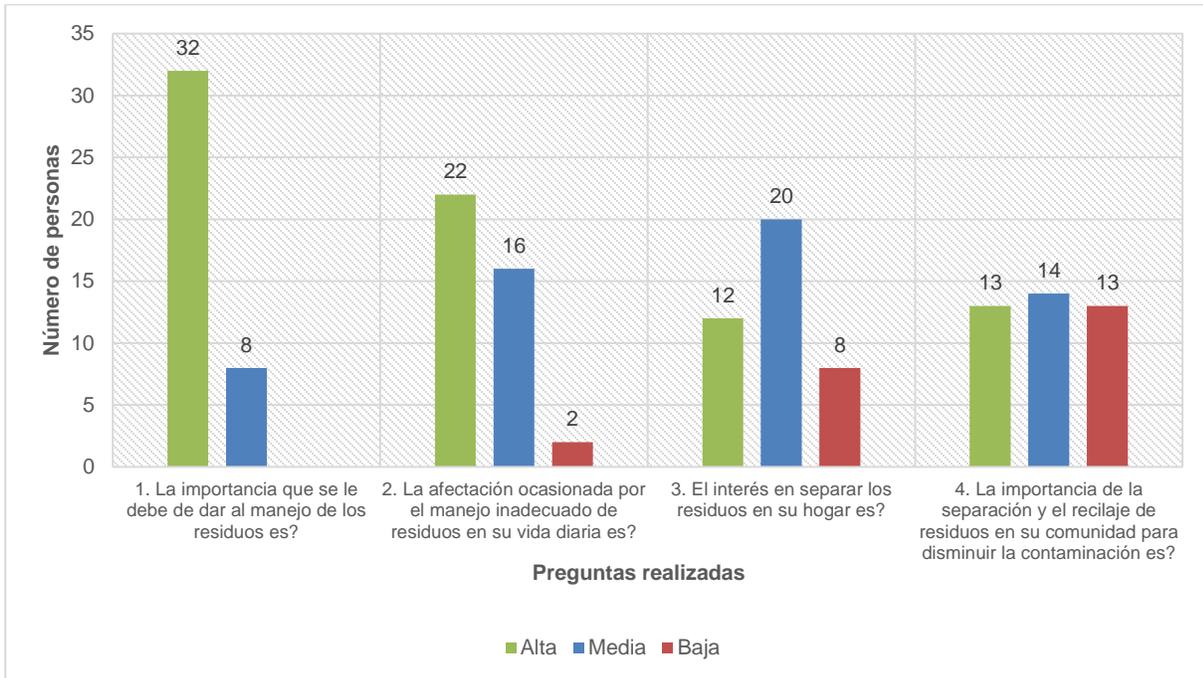


Figura 5.72 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible 5

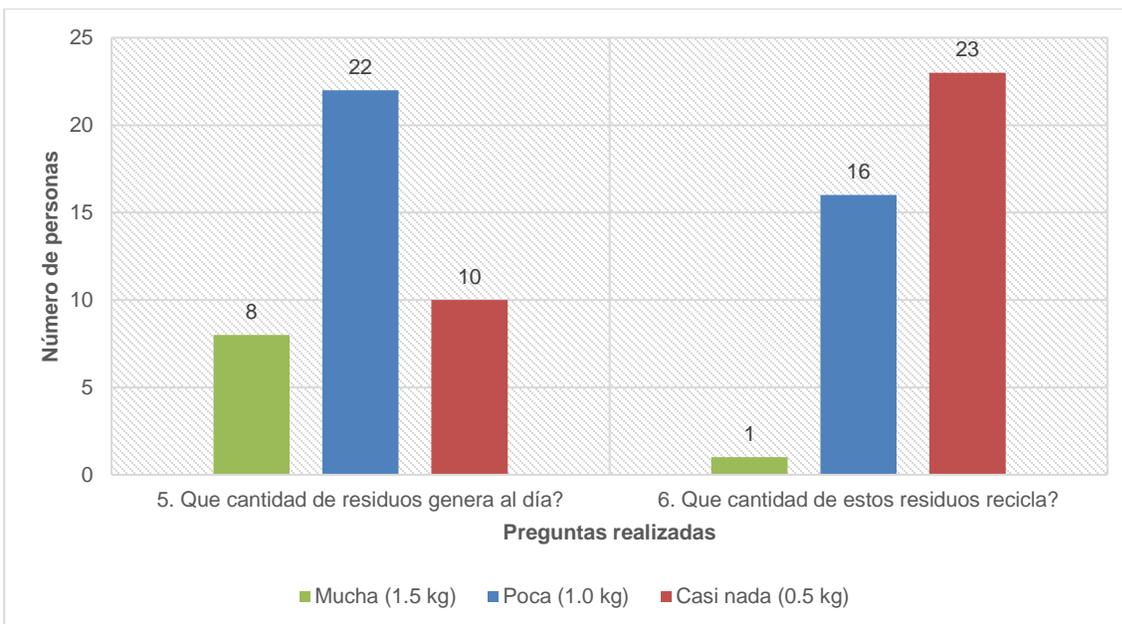


Figura 5.73 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible 5

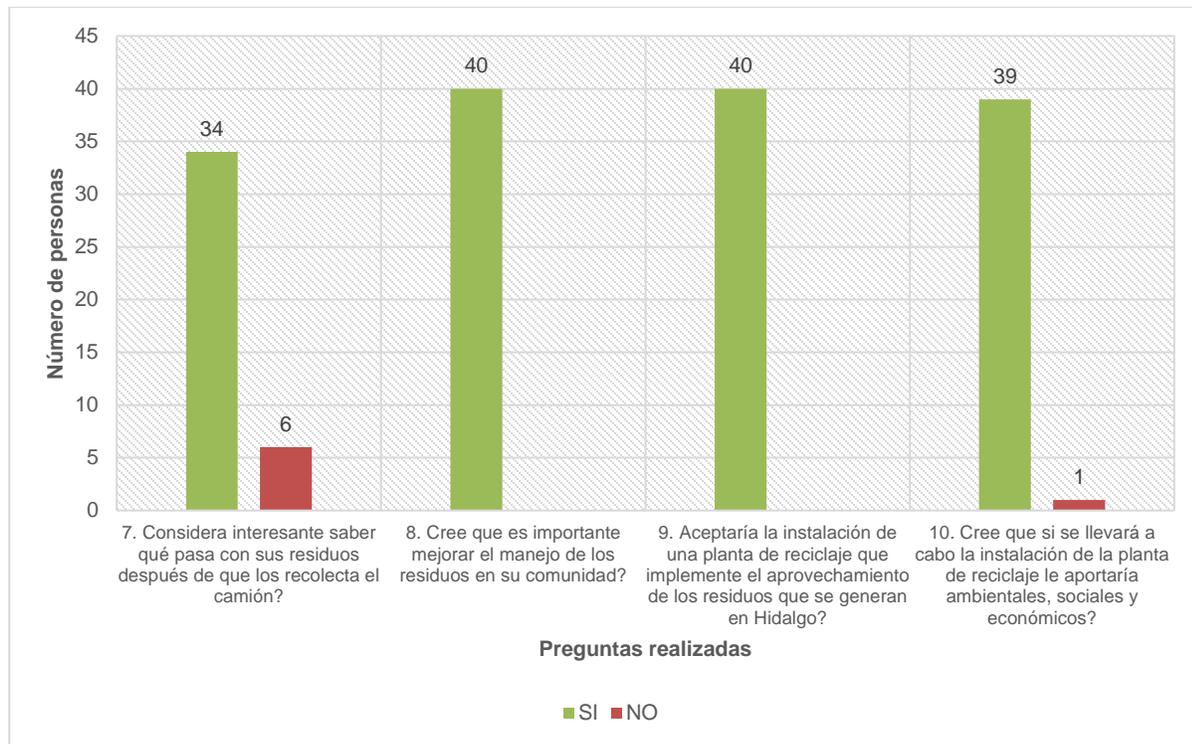


Figura 5.74 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible 5

Las encuestas del punto número 5 fueron realizadas en la capital del estado de Hidalgo, Pachuca. Los resultados muestran que la mayoría de las personas entrevistadas fueron hombres que tienen un empleo en particular o se dedican a ser estudiantes, en cuanto a las mujeres la mayoría son amas de casa. Los habitantes son originarios principalmente de la capital y de otros municipios del estado de Hidalgo. La mayoría considera que es importante dar un manejo adecuado a los residuos, así como la separación de sus residuos tanto en su vivienda como en su comunidad. Se genera un promedio de 1.0 kg/día, de estos residuos únicamente se separa una cantidad menor a 0.50 kg. Por último todos consideraron que si aceptarían que se llevara a cabo la instalación del CP-FIRSU para implementar el aprovechamiento de los residuos que se generan en el estado de Hidalgo, pero siempre y cuando su implementación sea de manera adecuada y que genere beneficios ambientales y sociales. Es importante también mencionar que algunos entrevistados comentaron que existe un programa de recolección de residuos separados (orgánicos e inorgánicos) implementado por el gobierno y la SEMARNAT, pero no se le ha dado la importancia ni el desarrollo adecuado tanto por las autoridades ambientales y por la propia sociedad.

En las Figuras 5.75, 5.76 y 5.77 se muestran los resultados de las encuestas realizadas en el punto factible 8.

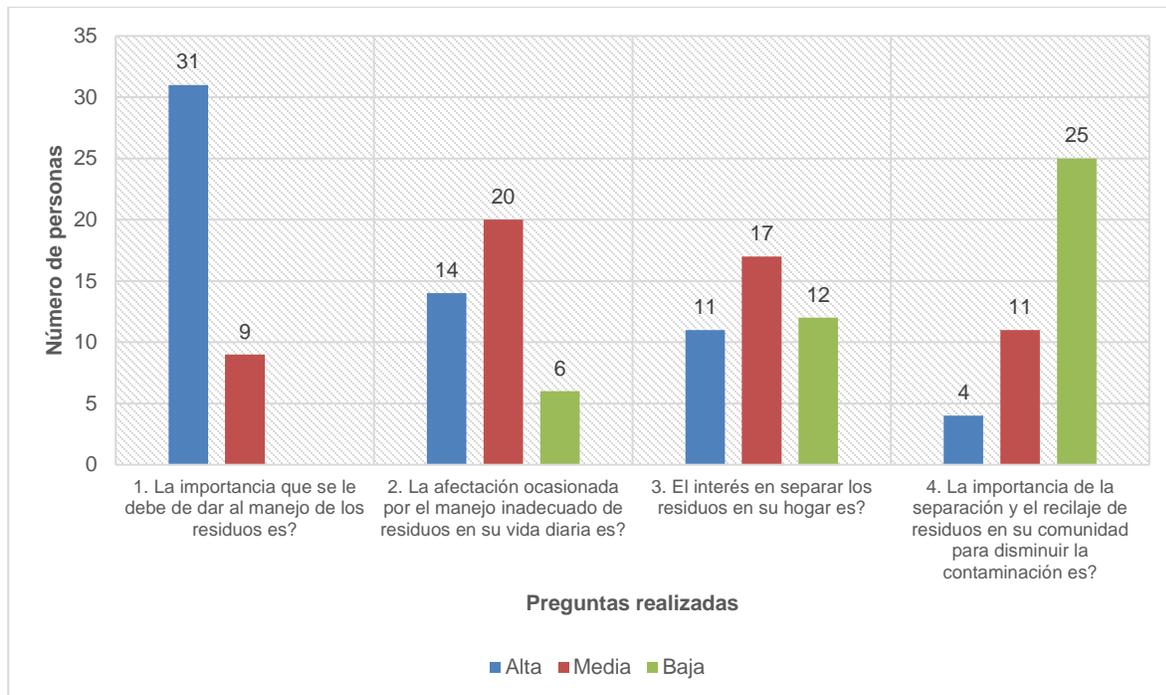


Figura 5.75 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible 8

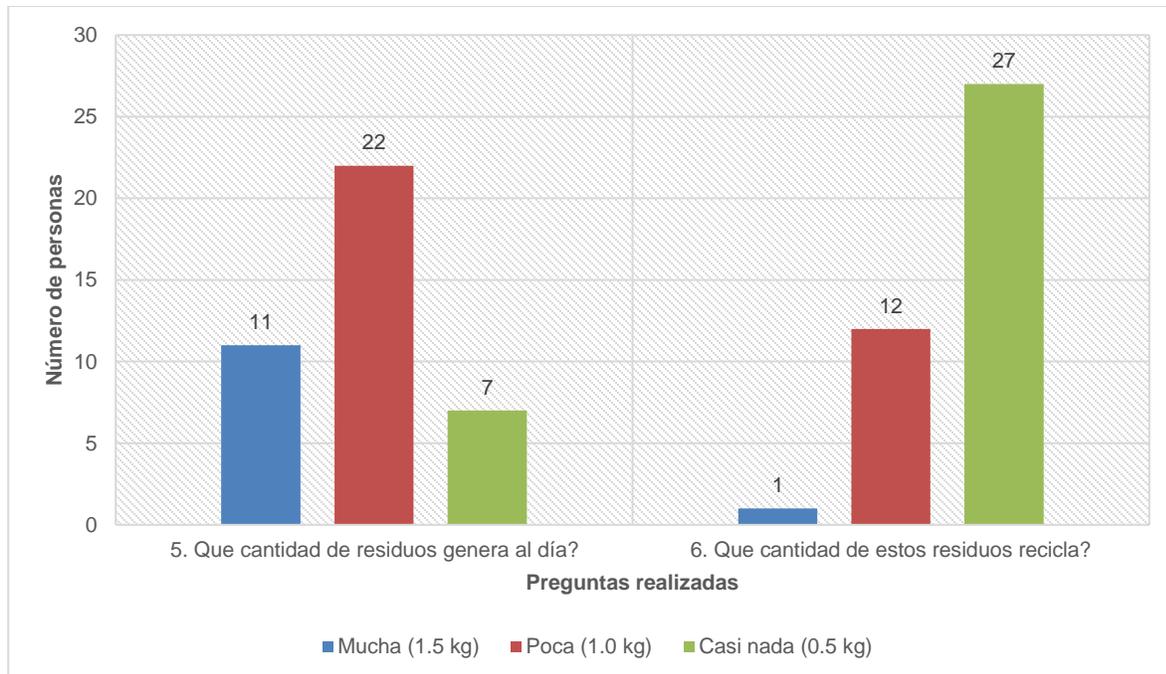


Figura 5.76 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible 8

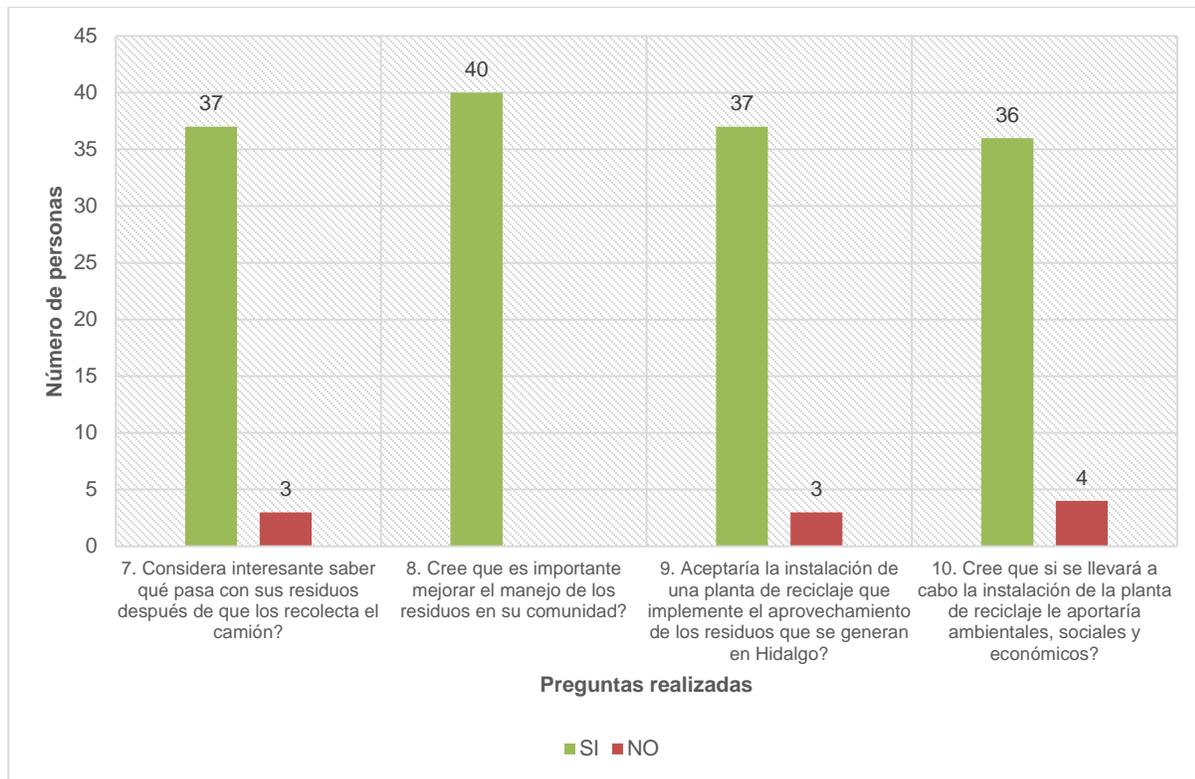


Figura 5.77 Resultados de la encuesta realizada (P7-P10) en el punto factible 8

Las encuestas del punto número 8 fueron realizadas en la localidad de San Juan Solís, perteneciente al municipio de San Agustín Tlaxiaca. Los resultados de las encuestas muestran que la mayoría de las personas entrevistadas fueron mujeres amas de casa y empleadas, en cuanto a los hombres la mayoría fueron agricultores y comerciantes de diferentes mercancías. Los habitantes son originarios principalmente de dicha localidad y de San Agustín Tlaxiaca. La mayoría considera que es importante dar un manejo adecuado a los residuos, pero por otro parte no existe un interés alto en separar sus residuos tanto en su vivienda como en su comunidad. Se genera un cantidad promedio de 1.0 kg/día, de estos residuos únicamente se separa una cantidad menor a 0.50 kg. Por último la mayoría considero que si aceptarían que se llevara a cabo la instalación del CP-FIRSU para implementar el aprovechamiento de los residuos que se generan en el estado de Hidalgo.

En las Figuras 5.78, 5.79 y 5.80 se muestran los resultados de las encuestas realizadas en el punto factible 16.

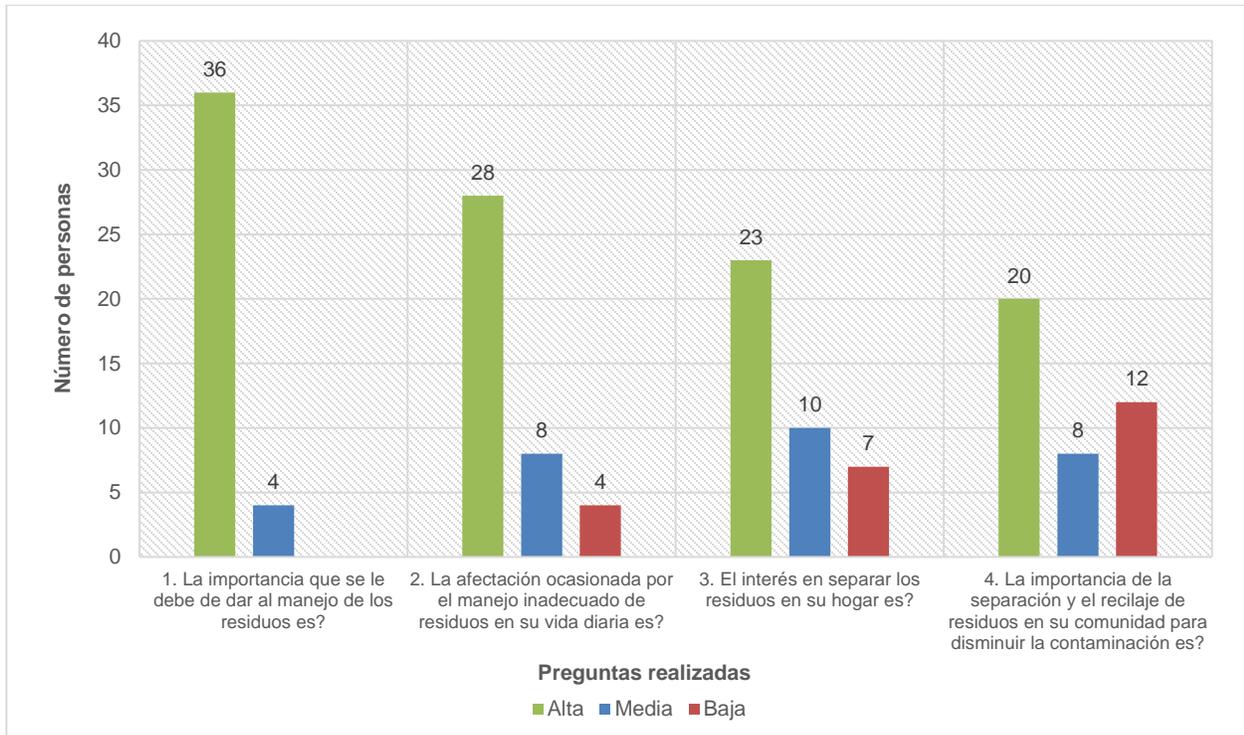


Figura 5.78 Resultados de la encuesta realizada (P1-P4) en el punto factible 16

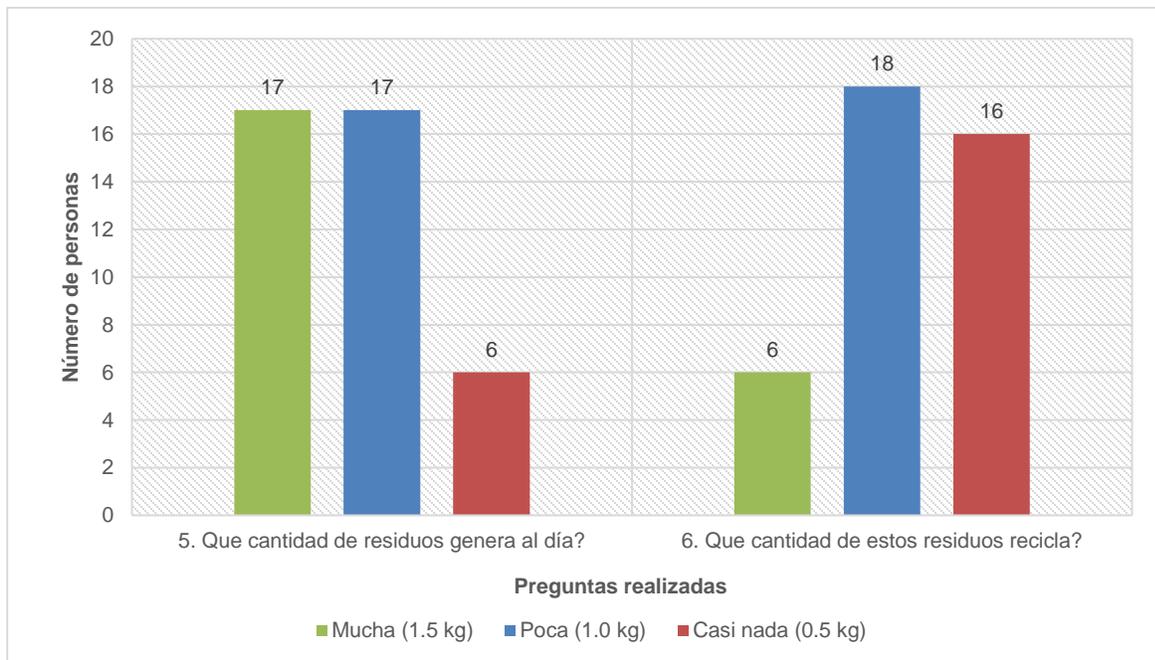


Figura 5.79 Resultados de la encuesta realizada (P5 y P6) en el punto factible 16

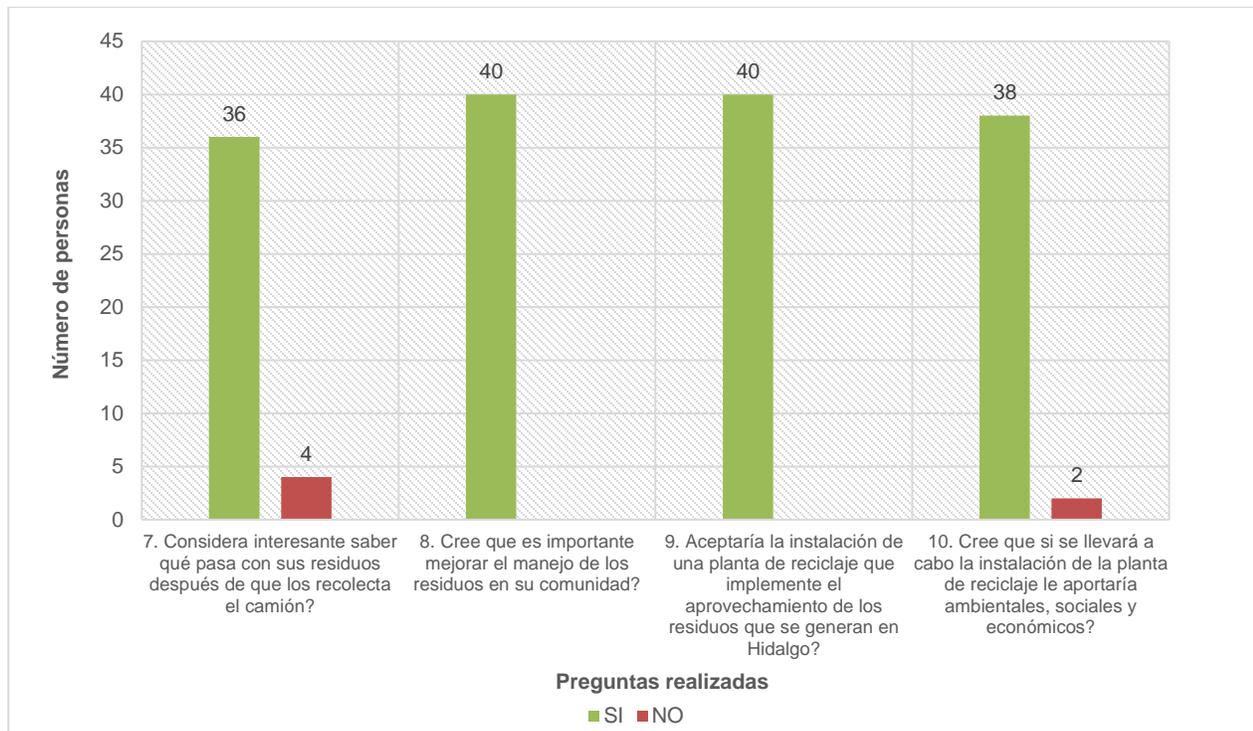


Figura 5.80 Resultados de la encuesta realizada (P7-P10) en el punto factible 16

Las encuestas del punto número 16 que se ubicó cerca del municipio de Huichapan, fueron realizadas en la comunidad de Dantzibojay, los resultados muestran que la mayoría de las personas entrevistadas fueron mujeres amas de casa y los hombres son en gran parte agricultores y comerciantes, las personas son originarios principalmente de Dantzibojay, Huichapan y otros municipios de Hidalgo. La mayoría opina que es importante dar un manejo adecuado a los residuos, pero por otro parte no existe un alto interés en separar sus residuos tanto en su vivienda como en su comunidad. Se genera un cantidad promedio de 1.0 a 1.50 kg y solo se separa la mitad de éstos, principalmente los residuos putrescibles son separados y empleados como alimento para los animales. Por último todos opinaron que si aceptarían que se llevara a cabo la instalación del CP-FIRSU para implementar el aprovechamiento de los residuos que se generan en el estado de Hidalgo.

6. CONCLUSIONES

En el estado de Hidalgo la mayor parte de los RSU que se generan son depositados inadecuadamente en rellenos sanitarios o en basureros a cielo abierto, lo cual impide que se maximice su aprovechamiento y que se generen beneficios ambientales y económicos.

A pesar de que en México existe normativa que promueve la valorización de los RSU, se carece de disposiciones legales específicas para evaluar la ubicación, diseño y construcción de centros de procesamiento de RSU. Sin embargo se analizó que existen normas a nivel federal (NOM-083-SEMARNAT-2003) y a nivel estatal (NTEA-013-SMA-RS-2011), así como manuales o estudios realizados por la SEMARNAT, que contienen lineamientos técnicos y ambientales que se pudieron aplicar para evaluar la ubicación óptima del CP-FIRSU en el entorno de los SIG.

Los centros de manejo integral que proporcionarán los RSU al CP-FIRSU se localizan en la región sur del estado de Hidalgo, así como las plantas cementeras.

La proyección de residuos a 20 años y la cantidad de residuos que son depositados en los sitios de disposición final actualmente, fueron la base para calcular la capacidad de la infraestructura y la inversión de la propuesta de instalación de los equipos conforman el CP-FIRSU.

Se determinó que el poder calorífico de los residuos procesados que integran las pacas FIRSU y que llegan a la planta cementera de CEMEX en Huichapan son viables para ser utilizadas en los hornos cementeros debido a que tienen un mayor poder calorífico, respecto al valor de los RSU mezclados que se identificaron en la revisión documental.

Se analizó que los equipos que se requieren para seleccionar y procesar de manera eficiente los RSU que lleguen al CP-FIRSU son principalmente: tolvas de recepción, bandas transportadoras, equipos de trituración (abre bolsas), equipos de separación de materia orgánica fermentable y no fermentable (trommeles), separación de residuos férricos (separador magnético), plataforma y cabina de selección manual, equipo de compactación (prensa de cámara cerrada HTR) y envoltura de pacas (enfardadora Cross Wrap). También se deben considerar, casetas de vigilancia, barda perimetral, área de recepción de residuos, zona de pesaje de vehículos y camiones, fosa de descarga de residuos, zona de separación manual y mecanizada, zona de compactación y enfardado y una zona de carga de pacas FIRSU y residuos reciclables.

A través de la ubicación y la validación *in situ* de los sitios factibles en términos de operación y capacidad, que proporcionarán los RSU al CP-FIRSU son: rellenos sanitarios regionales y municipales, así como la planta de separación “Cambio Verde”; los clientes potenciales para el consumo del combustible alternativo FIRSU son las plantas cementeras de CEMEX en Huichapan y Atotonilco, Hidalgo.

Las áreas obtenidas por medio de la EMC con una aptitud favorable en términos ambientales, técnicos y socioeconómicos para la instalación del CP-FIRSU se localizan en la zona centro del área de estudio y cerca de los municipios con mayor generación de residuos (Pachuca, Mineral de Reforma y Huichapan). A partir de la evaluación de estas áreas y un análisis fuente-destino se determinó que el punto factible número 8, ubicado en la localidad de San Juan Solís, perteneciente al municipio de San Agustín Tlaxiaca, es el terreno factible de ubicación para la propuesta de instalación del CP-FIRSU debido a las ventajas técnicas y normativas que se analizaron respecto a los otros puntos, así como las ventajas en cuestiones logísticas y costos de transporte.

De los resultados de las encuestas y visitas *in situ* en cada uno de los tres sitios factibles de ubicación se evaluó que la aceptación social fue favorable para llevar a cabo la propuesta de instalación del CP-FIRSU; sin embargo los habitantes cercanos al punto factible número 8 opinaron que si aceptarían la instalación de un CP-FIRSU a las afueras de la comunidad de San Juan Solís, siempre y cuando se conozca a detalle la integración y el desarrollo del proyecto.

7. RECOMENDACIONES

A pesar de que autoridades de los municipios como Tepeji del Río y de la capital Pachuca han implementado programas para que la población separe y reduzca sus residuos, es necesario elaborar un plan de manejo de RSU en Hidalgo en el que se incluyan campañas para que la población separe de manera consiente y correcta los residuos (biodegradables, con potencial de reciclaje, con aprovechamiento limitado, con aprovechamiento energético entre otros). Debido a que si la separación se realiza desde la fuente facilitaría el proceso de selección de los diferentes tipos de residuos que se recolectan, además se disminuiría la contaminación de residuos reciclables que se produce cuando se mezclan con residuos orgánicos fermentables.

Los residuos domésticos peligrosos deben separarse desde la fuente, para ser llevados a un confinamiento especial, evitando que lleguen al CP-FIRSU.

Para lograr el adecuado manejo de los RME como llantas, pilas, baterías de carros, residuos electrónicos y materiales ferrosos deben colocarse contenedores especiales tanto dentro, como fuera del CP-FIRSU para que sean depositados en éstos y posteriormente transportados a centros de tratamiento especializados.

Es importante conocer en el punto factible número 8 ubicado en la localidad de San Juan Solís, si es posible llevar a cabo la adquisición del terreno, también es importante analizar si se necesitaría llevar a cabo la instalación de centros de procesamiento móviles tomando como base los demás sitios factibles que se determinaron, para lograr mejorar la gestión de los RSU en el estado de Hidalgo.

Se recomienda llevar a cabo una investigación experimental para analizar la viabilidad para el tratamiento de los residuos orgánicos de rápida descomposición a través del compostaje, biodigestores u otro tratamiento que se considere conveniente. Debido a que si el compostaje es seleccionado, se pueda lograr una composta de calidad que pueda ser empleada en los diferentes campos de cultivo y como mejorador de suelo. El punto clave no es cuántas opciones de tratamiento se utilicen, o si se aplican todas al mismo tiempo, sino que sean parte de una estrategia que responda a las necesidades y contextos locales, así como a los principios básicos de la normativa ambiental en el tratamiento de los residuos.

8. REFERENCIAS

Araiza J. (2014). Emplazamiento de Estaciones de Transferencia de Residuos Sólidos Urbanos empleando herramientas SIG: un Caso de Estudio, Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 7(2), pp. 78-86.

Arellano D. y Guzmán P. (2011). Ingeniería Ambiental, 1^{er} edición, Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., Ciudad de México, pp. 85-96.

Camioneras, 2013. “Basculas de fosa Torrey”. Ciudad de México. Disponible en: <http://camioneras.com.mx> [23/09/14].

CANACEM (2006). Cámara Nacional del Cemento. Experiencia de la industria cementera mexicana en prácticas de coprocesamiento, tratamiento térmico y recuperación energética. Disponible en: http://www.gemi.org.mx/files/01_deguevara.pdf, [18/10/14].

CANACEM (2014). Cámara Nacional del Cemento. Disponible en: <http://www.canacem.org.mx/>, [29/10/14].

Cedano L. (2012). Valorización energética de residuos como combustibles alternativos en plantas cementeras. Universidad Politécnica de Valencia. España, Valencia, pp. 71-81.

CEMA (2009). Fundación laboral del Cemento y el Medio Ambiente. *Sustainable Energy Europe*. Producción sostenible de cemento, la recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera. Disponible en: <http://www.fundacioncema.org/Uploads/docs/ProduccionSostenibleCemento.pdf>, [03/11/14].

CEMA (2012). Fundación Laboral del Cemento y el Ambiente. Cuaderno técnico. Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España, pp. 40-47.

CEMEX (2012). Inclusión, Informe de desarrollo sustentable. Monterrey, México: CEMEX, pp. 18-25.

CEMEX (2013). Beneficios de una economía basada en una visión sustentable; Caso CEMEX-Pro Ambiente, pp. 2–12.

CESOP (2012). Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública Cámara de Diputados. Residuos sólidos urbanos en México, Núm. 51. Disponible en: <http://www3.diputados.gob.mx/.../Reporte-51-Residuo-solidos-urbanos-Mexico> [09/11/15].

Choy H., Ko K., Cheung H., Fung C., Hui W., Porter F. y Mckay G. (2004). Municipal solid waste utilization for integrated cement processing with waste minimization, A Pilot Scale Proposal. Process Safety and Environmental Protection, 82(B3) pp. 200–207.

CMIC (2011). Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Coprocesamiento de residuos. Cooperativa Cruz Azul, S.C.L., pp. 5-12.

Colmer M. y Gallardo I. (2013). Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, 1^{er} edición, Ciudad de México: Limusa: Editorial Universidad Politécnica de Valencia, pp. 165-190.

Cometel (2008). Equipos e Instalaciones para el Sector del Reciclaje de residuos. Disponible en: <http://www.cometel.net/> [04/10/14].

CONANP (2014). Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: <http://sig.conanp.gob.mx/website/anpsig/viewer.htm> [05/09/15].

CONAPO (2010-2030). Consejo Nacional de Población. Estimaciones y proyecciones de la población por Entidad Federativa, periodo 2010-2030. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos

Crosswrap (2015). Equipos para envoltura de residuos. Disponible en: <http://www.crosswrap.com/> [08/12/14].

DBGIR (2012). Diagnostico Básico para la Gestión Integral de Residuos. Versión Ejecutiva. INECC, SEMARNAT. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf [07/12/15].

De Pietri D., Dietrich, P., Mayo P. y Carcagno A. (2011). Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina. Revista Panam Salud Publica. Vol. 30, No. 4, pp. 377-387.

Esquer V. (2009). Reciclaje y tratamiento de los residuos sólidos urbanos. México: Instituto Politécnico Nacional, México D.F., pp. 50-52.

EUROSTAT (2014). European Commission. Landfill rate of waste excluding major mineral wastes. Disponible en: http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&language=en&pcode=t2020_rt110&toolbox=type

EUROSTAT (2015). Residuos de la Unión Europea en cifras. Disponible en: http://recuperaresiduosencementeras.org/reportaje.asp?id_rep=86_ [05/10/14].

ExpoNews (2012). CEMEX Innova en el coprocesamiento de residuos sólidos [11/09/14].

Gilbert M. Masters y Wendell P. Ela (2008). Introducción a la Ingeniería Medioambiental 3^{er} edición, PEARSON Prentice Hall S.A., Madrid, 2008, pp. 680 – 690.

Gómez M. y Barredo J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio, 2a ed. actualizada, Editorial RA-MA, Madrid, pp. 276-278.

González G. (2014). El Biogás como generador de energía; Ecotecnología de aplicación urbano-arquitectónica para Pachuca de Soto Hidalgo. Cd Universitaria, México D.F., pp. 30-45.

Güereca H. (2013). Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM Gaceta del Instituto de Ingeniería, Número 86, Enero, pp. 16-19.

GUIA PMPGIRSU (2006). Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Colaboración SEMARNAT- GTZ. Primera edición, México, DF., Enero de 2006, pp.15-17.

Gutiérrez, R. (2015). Entrevista como ingeniero encargado de la coordinación de la planta de selección de residuos en San Juan de Aragón, Ciudad de México. [Realizada el 18 de septiembre de 2015].

Herrera B. (2014). Identificación de áreas potenciales para el manejo de residuos o desechos peligrosos en el departamento de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia, pp. 13-16.

Holcim (2013). Guía para el Coprocesamiento de Residuos en la Producción de Cemento. Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim, , pp. 15-20.

INECC (2012). Diagnostico Básico Extenso para la gestión integral de los residuos. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf, [16/08/14].

INEGI (2015). Banco de Información de INEGI. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/> [10/09/15].

INEGI (2014). Censo de Población y Vivienda 2010: consulta interactiva de datos. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=pob&c=1 [18/10/15].

INEGI (2014a). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/descarga/?c=200> [20/10/15].

INEGI (2014m). Marco Geoestadístico 2014 versión 6.2. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825004386> [14/09/15].

INEGI (2013). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/anuario_multi/2013/hgo/AEyGHGO13.pdf [20/09/15].

INEGI (2010). Estadística básica sobre el medio ambiente, Hidalgo. Obtenido a través de internet: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/boletines/boletin/Comunicados/Especiales/2013/Abril/comunica20.pdf>, [20/08/14].

ICR (2014). International Cement Review. Alternative fuels: “Getting to the source”, CEMEX, No. 6, pp.12-13.

ISWA (2009). International Solid Waste Association. Residuos y cambio climático. Libro blanco de ISWA, p.p. 9-14.

Komptech, 2015. Equipo para procesamiento de biomasa y los residuos. Disponible en: <http://www.komptech.com> [08/11/14].

LGEEPA (2012). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/leyes-federales> [12/08/14].

LGPGIR (2014). Ley General de la Prevención y Gestión Integral de Residuos. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR.pdf [10/08/14].

Lippel (2014). Soluciones integrales para Biomasa. Trituradora de residuos. Disponible en: http://www.lippel.com.br/es#.VcypX_I_Okp [04/11/14].

Liugong (2015). Empresa encargada de fabricar maquinaria pesada. Cargadores Frontales. Disponible en: <http://www.liugong.pe/producto/ver/id/5> [07/11/14].

Logismarket (2015). Prensas y compactadoras de residuos. México, D.F. Disponible en: <http://www.logismarket.com.mx/gruas-para-reciclaje/3529416269-cp.html> [12/11/14].

LRSDF (2012). Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Asamblea legislativa del Distrito Federal III legislatura, México. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/03/local/01clave.pdf> [14/08/14].

Mackenzie L. Davis & Susan J. Masten (2005). Ingeniería y Ciencias Ambientales, 1^{er} edición, Mc Graw Hill, Ciudad de México pp. 10-14.

MANUFACTURA (2014). Información estratégica para la industria. Disponible en: <http://www.manufactura.mx/industria/2014/07/09/elementia-estrena-planta-cementera-en-hidalgo>, [30/10/14].

Masyas Recycling (24 de septiembre de 2015). Evaluación técnica y oferta económica para la instalación de un CP-FIRSU para el tratamiento de RSU en el estado de Hidalgo. Realizada por las empresas Grupo Transforma Ambiental de México y Masias Recycling de España.

Medina G. (2009). Diseño de estaciones de transferencia de residuos sólidos para los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Tecpan de Galeana. Cd. Universitaria, Ciudad de México, pp. 12-22.

Mokrzycki E. & Uliasz-Bochenczyk A. Alternative fuels for the cement industry. Applied Energy. 74 (2003) pp. 95-96.

Müller G. (2015). Valorización energética de RSU. Foro de Valorización Energética de Residuos. Disponible en: <http://www.foroenres2015.mx/presentaciones.php> [12/10/15].

NADF-024-AMBT (2013). Norma Ambiental para el Distrito Federal. Disponible en: <http://www.anipac.com/NADF024OFICIAL.pdf> [07/09/15].

NTEA-013-SMA-RS (2011). Norma Técnica Estatal Ambiental. Establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, para el Estado de México, pp. 2-13.

NOM-083-SEMARNAT (2003). Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf> [12/09/15].

Olivas U., Valdez J., Aldrete A., González M. y Vera G. (2007). Áreas con Aptitud para establecer Plantaciones de Maguey Cenizo: definición mediante Análisis Multicriterio y SIG, *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), pp. 411-419.

PAALGROUP (2013). ECONOVO: Tecnología Sustentable. Disponible en: <http://www.econovo.com.ar/equipos/prensas/htr/htr.htm> [08/10/14].

Penido M., Gilson L. y Segala K. (2006). Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe, 1^{er} edición, Rio de Janeiro, IBAM, 2006 pp. 30-43.

Pitchel J. (2005). *Waste Management Practices*, 3^{er} edición, Taylor & Francis Group, USA, New York, pp. 169 - 210.

PEPGIR de Hidalgo, 2011. Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Estado de Hidalgo, pp. 14-30.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA, (2012). Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento, Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Cartagena: UNEP, pp. 109.

Puig I., Jofra M. Calaf M. (2012). Análisis económico-ambiental de la utilización de CDR en España. Campaña de energía y cambio climático de Greenpeace, España, pp. 6-12.

Queiroz L., Fortes P. y Rubens C. (2013). Waste materials coprocessing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 19, pp. 200–207.

RAN (2014). Sistema de Información Geoespacial. Disponible en: <http://catalogo.datos.gob.mx/organization/ran> [05/09/15].

Roé S. (2011). Propuesta de un centro de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos para la delegación Milpa Alta. Cd Universitaria, Ciudad de México, pp. 1-5.

Roé S., Rojas-Valencia y Torres R. (2014). “Location of a site appropriate for building a waste management center urban solid by three methods”, *Journal AIDIS of Engineering and Environmental Sciences: Research, development and practice*, Vol. 7, No. 2, pp. 141-153.

Rojas-Valencia (2012). Tecnologías para atender la situación de los residuos sólidos urbanos y agua en la ciudad de México, En: S. E. Martínez Rivera y Trápaga Delfín (coords.). *Construyendo ciudades sustentables: experiencia Pekín y la ciudad de México*, UNAM, pp. 10-14.

Rojas-Valencia y Marín M. (2014). “Gestión y coprocesamiento de residuos sólidos urbanos”, *Revista IC Ingeniería Civil de ingeniería y ciencias ambientales*, No. 545, pp. 20-23.

Sánchez O. (2007). Gestión integral de residuos sólidos urbanos en los municipios de Actopan, San Salvador y El Arenal del estado de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones Químicas., pp. 25-33.

Sánchez, J., Estrada, R., Ramos, C., Carmona, R., Cano, P, Semadeni, I. (1996). Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas (en línea). Publicación conjunta del Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Asociación Mexicana para el control de residuos sólidos y peligrosos, A.C., Serie: Cuadernos de Trabajo 5. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/105.pdf> [27/09/15].

Saaty T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, pp. 15-19.

SEDEMA (2012). Infraestructura para el manejo de residuos sólidos. Disponible en: <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/temas-ambientales/programas-generales/residuos-solidos/inventario-residuos-solidos-2013/capitulo-2.pdf> [17/09/14].

SEMARNATH (2015). Secretaría del Medio Ambiente del estado de Hidalgo. Datos del manejo de residuos en sitios de disposición final. Rellenos sanitarios municipales y regionales [12/05/15].

SEMARNAT (2009-2012). Libro blanco: Programa Nacional Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Disponible en: <http://web2.semarnat.gob.mx/transparencia/Documents/rendicion/LIBRO%20BLANCO%20PNP%20GIR.pdf> [25/08/14].

SEMARNAT, Rubro 3 (2014). Coprocesamiento de residuos sólidos industriales, Disponible en: <http://tramites.semarnat.gob.mx/images/stories/menu/empresas/rubro3.pdf> [24/04/14].

SEMARNAT, 2010. Directorio de centros de acopio de materiales provenientes de residuos en México. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/transparencia/transparenciafocalizada/residuos/Documents/directorio_residuos.pdf [28/08/14].

SEMARNAT (2010). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Criterios para la ubicación, operación y cierre de infraestructura ambiental para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Diciembre de 2010. Contrato DGRMIS-DAC-DGFAUT-NO. 012/2010, pp. 5-16.

Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos, 1^{er} edición, Vol. II, Mc Graw Hill, Madrid, España pp. 611-658.

Torcal (2015). Carretillas elevadoras. Disponible en <http://torcal.es/es-cursoformacion-5-62--carretillas-elevadoras> [22/09/14].

ANEXOS

Tabla A.1 Descripción técnica de los rellenos sanitarios municipales en el estado de Hidalgo

No.	Relleno Sanitario	Ubicación	Superficie total del predio (m ²)	Cantidad de residuos que se depositan (ton/día)	Categoría				No. De Celdas	Operatividad del relleno sanitario	Año de apertura	Aprovechamiento	
					A	B	C	D				SI	NO
1	Pachuca de Soto	Localidad del Huixmi.	-	-	X					1	El relleno es operado por el municipio de Pachuca, así mismo presta el servicio a los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte y San Agustín Tlaxiaca.	1996-2000	X
			-	-		2	2000-2008						
			-	-		3	2008-2011						
			-	-		4	2011-2014						
			182,277.14	454		5	2014-2016						
2	Villa de Tezontepec	Predio ubicado en la fracción del Rancho Guadalupe (al inicio de cerro gordo).	6,251.58	10					X	1	El relleno es operado por el propio municipio.	2013	X
3	Tepeji del Río	Localidad El Cerril del barrio San Mateo, segunda sección, Las Trojes y el Yermal.	90,858.89	72		X				1	El relleno es operado por el propio municipio.	2004	X
										2		2010	X
4	Francisco I. Madero	Predio Rustico denominado El Palmar, localidad de la Mora.	100,404.00	24			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2011	X
5	Tecoautla	Predio conocido como el Solis, Barrio La Cochera, localidad Bothe.	30,000.00	8			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2010	X
6	Chilcuautila	Predio El Horno uno y el Horno dos, localidad El Deca.	50,000.00	15			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2011	X
7	Cuautepec de Hinojosa	Predio Rustico Los Encinos, comunidad de San José Vista Hermosa.	57,967.11	40-50			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2013	X
8	Zempoala	Camino a la Mina, ubicado en el núcleo Ejidal de Zempoala.	40,000.00	22			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2013	X
9	Tlanalapa	Predio Rustico camino que conduce a San Juan km 1.5,	29,000.00	8				X		1	El relleno es operado por el propio municipio.	2010	X
10	Tasquillo	Ejido Cerro Blanco, Localidad Portezuelo.	20,891.59	18			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2013	X
11	Huasca de Ocampo	Barrio La Yerbabuena.	20,000.00	14			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2009	X
12	Huichapan	Poblado San José Atlán, conocido como La Loma.	20,000.00	30			X			1	El relleno es operado por el propio municipio.	2010	X
13	San Agustín Metzquititlán	Margen Izquierda-Tampico km 70, comunidad de Milpillias	3,000.00	1				X		1	El relleno es operado por el propio municipio.	2010	X

Tabla A.2 Descripción técnica de los rellenos sanitarios regionales en el estado de Hidalgo

No.	Relleno Sanitario	Municipios que lo integran	Ubicación	Superficie total del predio (m ²)	Categoría				Cantidad de residuos que se depositan (ton/día)	Operatividad del relleno sanitario	Año de apertura	Aprovechamiento	
					A	B	C	D				SI	NO
1	Tula de Allende.	Tula de Allende, Atitalaquia, Tlaxcoapan, Tlahuelliapan y Atotonilco de Tula.	Predio Agua Negras también conocido como El Gavillero, Municipio de Tula de Allende.	47,169	X				102	Lo opera la empresa "Grupo Comercial Arcángel, S.A de C. V"	2011		X
2	Santiago Tulantepec.	Epazoyucan, Tulancingo, Singuilucan y Santiago Tulantepec.	Ex hacienda de Santa Ana del Monte s/n, Comunidad Las Lajas km 81 de la carretera 132, México – Tulancingo, Municipio de Santiago Tulantepec.	130,000	X				140	Relleno Sanitario privado operado por la empresa "Proactiva Medio Ambiente S.A de C.V.	2011		X
3	Apan.	Apan, Almoloya, Emiliano Zapata y Tepeaculco.	Km 47, camino Tecomal-El Maguey, Localidad de Buena Vista, Municipio de Apan.	76,250	X				109	Lo opera la empresa ECOMÉXICO S.A de C.V.	2014		X
4	Chapatongo.	Alfajayucan, Chapatongo, Nopala de Villagrán y Tepatitlán.	Predio La Rinconada, ubicado en el Ejido Chapatongo, Municipio de Chapatongo.	14,868			X		52	No está en operación	2015		X
5	Huehuetla, Tenango de Doria y San Bartolo Tutotepec.	Tenango de Doria, San Bartolo Tutotepec y Huehuetla.	Predio ubicado en El Xindhó Municipio de Huehuetla.	29,538		X			48	Operado por la Empresa Krumo Grupo Constructor	2014		X
6	Mixquiahuala.	Mixquiahuala de Juárez y Progreso de Obregón	Predio Boxaxni, Colonia Veracruz, Municipio de Mixquiahuala.	47,755			X		40	No está en operación	2015		X
7	Metepec-Agua Blanca-Acatlán.	Metepec, Agua Blanca y Acatlán.	Predio Rustico El Yolo, Ejido de Hueyotlipa, Municipio de Acatlán.	27,000			X		34	No está en operación	2015		X

Tabla A.3 Resultados de la fase 1 y 2 del análisis fuente-destino para la determinación de los tres puntos factibles para la ubicación del CP-FIRSU

F1	Orígenes (oferta = sitios de manejo de RSU)		Destinos (demanda = puntos de ubicación), distancias en km*															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
R S R *	Tula de Allende	1	14.104	12.354	114.911	84.755	83.561	66.804	64.548	43.373	29.715	89.338	40.633	54.057	3.197	18.756	15.685	12.213
	Metepec	2	136.717	145.753	70.173	59.437	65.522	69.821	72.106	88.118	148.348	174.001	133.005	176.757	130.05	149.277	145.908	140.036
	Santiago Tulantepec	3	122.867	131.904	28.274	35.303	35.303	55.971	59.879	75.89	136.121	160.151	120.778	162.907	116.2	135.427	132.058	126.067
	Apan	4	205.196	148.975	31.588	57.4	38.948	76.988	80.896	96.907	58.922	176.697	139.899	182.028	135.321	154.548	151.18	145.308
	Chapatongo	5	54.003	46.938	64.277	128.982	126.492	111.815	108.436	88.384	25.511	45.15	59.011	9.869	52.165	39.733	41.215	61.181
	Mixquiahuala	6	50.397	41.899	100.307	70.15	68.588	51.831	44.471	28.399	44.269	85.357	26.376	68.136	35.854	60.241	51.046	41.738
	Huehuetla	7	189.628	198.664	97.083	112.346	118.431	122.728	123.627	139.639	199.869	226.91	185.914	229.666	181.571	202.186	197.429	193.172
	Σ DISTANCIAS (km)*	=	772.912	726.487	506.613	548.373	536.845	555.958	553.963	560.71	642.755	957.604	705.616	883.42	654.358	760.168	734.521	719.715
	\$ TOTAL DE TRANSPORTE	=	\$ 32,462	\$ 30,512	\$ 21,278	\$ 23,032	\$ 22,547	\$ 23,350	\$ 23,266	\$ 23,550	\$ 26,996	\$ 40,219	\$ 29,636	\$ 37,104	\$ 27,483	\$ 31,927	\$ 30,850	\$ 30,228
R S M *	Pachuca	8	92.102	93.357	47.431	17.836	8.333	17.055	20.964	39.976	106.676	123.079	81.865	106.279	77.364	96.949	93.52	87.269
	Villa de Tezontepec	9	103.983	119.976	73.201	43.605	34.952	43.674	46.831	63.595	133.295	149.698	108.484	132.898	103.983	123.568	120.139	113.888
	Tepeji del Rio	10	22.28	21.531	145.515	115.357	102.516	97.406	97.406	73.976	47.674	131.8	61.52	68.277	32.96	31.504	28.075	31.632
	Francisco I. Mdero	11	62.793	50.454	91.657	62.816	48.658	43.548	37.136	21.066	53.631	89.776	30.785	72.966	40.437	57.671	55.617	50.341
	Tecoautla	12	95.015	89.88	161.345	129.87	117.031	111.921	105.509	106.258	65.003	89.767	76.544	42.218	97.072	80.122	81.842	101.658
	Chilcuautla	13	64.14	53.499	119.867	91.026	76.868	71.759	65.346	49.276	49.188	77.219	12.259	60.419	49.402	54.438	58.073	55.826
	Cuautepec de Hinojosa	14	150.683	152.699	48.373	55.728	73.797	76.397	80.306	96.318	166.018	182.42	141.207	165.621	136.706	156.291	152.862	146.611
	Zempoala	15	103.295	119.288	19.26	29.822	39.823	42.986	46.895	62.907	147.948	149.01	107.796	132.21	103.295	122.88	119.451	113.2
	Tlanalapa	16	118.635	134.629	19.055	45.162	55.165	56.325	62.236	78.247	147.948	164.351	123.137	147.55	118.635	138.222	134.792	128.532
	Tasquillo	17	81.759	76.274	121.984	90.509	77.668	72.558	66.147	68.895	46.756	39.514	37.181	22.714	67.021	62.11	63.595	83.412
Huasca de Ocampo	18	120.874	122.128	69.403	35.442	44.718	49.907	49.735	65.747	135.447	151.85	110.636	135.05	106.135	125.721	122.291	116.04	
Huichapan	19	68.39	62.676	173.598	143.441	139.03	133.92	127.508	128.256	37.799	39.381	72.211	53.855	65.436	53.153	54.637	74.453	
	Σ DISTANCIAS (km)*	=	1083.949	1096.391	1090.689	860.614	818.559	817.456	806.019	854.517	1137.383	1387.865	963.625	1140.057	998.446	1102.629	1084.894	1102.862
	\$ TOTAL DE TRANSPORTE	=	\$ 45,526	\$ 46,048	\$ 45,809	\$ 36,146	\$ 34,379	\$ 34,333	\$ 33,853	\$ 35,890	\$ 47,770	\$ 58,290	\$ 40,472	\$ 47,882	\$ 41,935	\$ 46,310	\$ 45,566	\$ 46,320
PS *	Planta de selección	20	87.327	89.342	50.276	18.405	10.168	13.119	17.027	33.038	100.224	159.912	78.116	124.396	73.349	92.93	89.503	85.435
	Σ DISTANCIAS (km)*	=	87.327	89.342	50.276	18.405	10.168	13.119	19.027	33.038	100.224	159.912	78.116	124.396	73.349	92.93	89.503	85.435
	\$ TOTAL DE TRANSPORTE	=	\$ 3,668	\$ 3,752	\$ 2,112	\$ 773	\$ 427	\$ 551	\$ 799	\$ 1,388	\$ 4,209	\$ 6,716	\$ 3,281	\$ 5,225	\$ 3,081	\$ 3,903	\$ 3,759	\$ 3,588
	COSTO TOTAL	=	\$ 81,656	\$ 80,313	\$ 69,198	\$ 59,950	\$ 57,354	\$ 58,234	\$ 57,918	\$ 60,827	\$ 78,975	\$ 105,226	\$ 73,389	\$ 90,211	\$ 72,498	\$ 82,141	\$ 80,175	\$ 80,137

F2	Destinos (demanda = sitios de valorización energética)		Orígenes (oferta = puntos de ubicación) distancias en km *															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Plantas cementerías	Huichapan	1	78.392	73.259	166.558	139.832	126.716	121.879	115.468	122.774	49.315	27.343	86.505	50.685	76.095	63.588	65.071	87.821
	Atotonilco	2	13.983	23.908	117.128	87.675	74.56	80.061	67.468	46.293	42.746	102.273	44.304	66.993	15.286	29.863	26.793	7.128
	Cruz Azul	3	5.577	9.081	131.655	102.202	89.087	94.587	81.994	60.82	28.681	88.207	58.831	52.927	29.813	15.797	12.727	14.93
	El Palmar	4	87.562	82.765	91.944	65.218	52.102	47.266	40.854	48.16	76.798	73.677	43.747	56.639	73.585	85.705	86.878	83.493
	Vito	5	16.144	26.069	114.934	85.481	72.365	77.867	65.273	44.099	44.909	104.434	42.109	69.156	13.092	32.025	28.955	9.29
	Tula	6	19.589	29.514	113.756	84.303	71.186	75.351	64.095	42.921	48.354	107.879	40.931	72.601	11.914	35.47	32.4	12.735
	Σ DISTANCIAS (km)*	=	221.247	244.596	735.975	564.711	486.016	497.011	435.152	365.067	290.803	503.813	316.427	369.001	219.785	262.448	252.824	215.397
	\$ TOTAL DEL TRANSPORTE	=	\$ 9,292	\$ 10,273	\$ 30,911	\$ 23,718	\$ 20,413	\$ 20,874	\$ 18,276	\$ 15,333	\$ 12,214	\$ 21,160	\$ 13,290	\$ 15,498	\$ 9,231	\$ 11,023	\$ 10,619	\$ 9,047

Productos derivados de la tesis

Artículo publicado en libro de divulgación internacional

J. E. Sánchez, J. A. Araiza, M. N. Rojas-Valencia, 2016. Analysis used for the installation of an IFMSW processing center for cement plants in the state of Hidalgo, Mexico. Ecology and the Environment, volume 202, WIT PRESS, Conference Waste Management, 2016.

Artículo publicado en revista de divulgación científica

J. E. Sánchez, M. N. Rojas-Valencia, 2016. Estudio técnico y ambiental para instalar un Centro de Procesamiento de la FIRSU en el estado de Hidalgo. Revista Entorno Académico. Memorias del Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Ambiental celebrado del 17 al 18 de Marzo de 2016 en Guaymas, Sonora. Año 13, Número 16.

Artículos en extenso en congresos nacionales

J. E. Sánchez Polito, M. N. Rojas-Valencia, J. A. Araiza Aguilar, M. Vaca Mier, 2016. Selección de un sitio para la instalación de un centro de procesamiento de residuos sólidos urbanos en Hidalgo. 8vo Encuentro Nacional de Expertos en Residuos, 5-7/10/2016. Santiago de Querétaro, Querétaro.

Participación como coautor en la publicación del capítulo del libro Materials Science and Technology.

M. N. Rojas-Valencia, D. Morillón, S. M. Maldonado and J. E. Sánchez. Recycling Solid Waste by Co-Processing, Materials Science and Technology.

Estancia académica en la Universidad Nacional de Colombia sedé Bogotá, a cargo del maestro Oscar Suarez Medina, coordinador del posgrado en Ingeniería Química y Ambiental en dicha Universidad.