

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**"SISTEMA DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO DE
RESIDUOS CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA"**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS**

PRESENTA

PAUL ADOLFO TABOADA GONZÁLEZ

DIRECTOR

DRA. CAROLINA ARMIJO DE VEGA

CODIRECTOR

DRA. SARA OJEDA BENÍTEZ

Mexicali, B.C.

Julio de 2011

AGRADECIMIENTOS

"Si yo pudiera enumerar cuánto debo a mis grandes antecesores y contemporáneos, no me quedaría mucho en propiedad"

Johann W. Goethe

En primera instancia, agradezco a Dios por permitirme cumplir con este objetivo tan importante en mi vida, a pesar de tantas dificultades, tristezas y privaciones, y por los ángeles y bendiciones que me envías día a día.

Deseo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me concedió para la realización de mis estudios doctorales. A la Universidad Autónoma de Baja California, al Instituto de Ingeniería, al XIX Ayuntamiento de Ensenada y al Ing. Jorge Aldama Marín, gracias por todas las facilidades y apoyos que me otorgaron durante el desarrollo de mi investigación. Un agradecimiento especial al Biol. Víctor Arenas Lío por sus acertadas opiniones y consejos, que permitieron afinar datos importantes en esta investigación.

A mi directora de tesis, Dra. Carolina Armijo de Vega, quiero agradecerle su guía, confianza e invaluable apoyo durante mi desarrollo doctoral. Fue muy satisfactorio trabajar bajo su dirección. A mi co-directora de tesis, Dra Sara Ojeda Benítez, gracias por tanto apoyo, motivación y esperanzas brindadas desde el momento que ingresé en el programa doctoral; gracias por el oxígeno en momentos tan importantes.

A mi madre y mis hermanos, gracias porque su ejemplo de fe, paciencia y tenacidad ha sido una guía en mi vida. A todas las personas que me brindan o me han brindado su apoyo durante mi desarrollo profesional y personal, externo mi más profundo agradecimiento y respeto.

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mi esposa, Quetzalli Aguilar, quien ha complementado mi vida con su apoyo incondicional e incansablemente desde hace 13 años y ha estado a mi lado en cada grado académico que he obtenido. Gracias Quetzalli por todo tu amor, comprensión y por ser mi puerto de refugio en momentos difíciles.



ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Justificación.....	8
1.4. Hipótesis	13
1.5. Objetivos	13
1.5.1. Objetivo general.....	13
1.5.2. Objetivos específicos.....	13
1.6. Preguntas de investigación.....	14
1.7. Delimitaciones	15
1.7.1. Geográfica.....	15
1.7.2. De conocimiento.....	15
1.8. Usuarios potenciales.....	15
1.9. Descripción de los sitios de estudio.....	15
1.10. Bosquejo Metodológico.....	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Residuos sólidos.....	17
2.1.1. Caracterización de residuos.....	18
2.1.2. Generación per cápita de residuos	19
2.1.3. Composición de los residuos	22
2.1.4. Propiedades de los residuos sólidos.....	24
2.1.4.1. Peso específico (ρ)	24
2.1.4.2. Contenidos de humedad.....	26
2.1.4.3. Cenizas.....	27
2.1.5. Disposición de residuos.....	27
2.1.5.1. Rellenos sanitarios y vertederos	27
2.1.5.2. Pepenadores.....	29
2.2. Tecnologías para el tratamiento de residuos con recuperación de energía.....	30
2.2.1. Tratamiento por digestión anaerobia.....	31
2.2.1.1. Tipos de digestores	34
2.2.1.2. Aplicaciones del digestor	35
2.2.1.3. Consideraciones en la construcción de digestores.....	38
2.2.1.4. Transporte de sustrato.....	40
2.2.1.5. Estimación de la generación de biogás	40
2.2.1.6. Evaluación económica	41
2.2.2. Tratamiento por gasificación	44
2.2.2.1. Tipos de gasificadores	46
2.2.2.2. Aplicaciones.....	49
2.2.2.3. Operación.....	50
2.2.2.4. Operación con RSM.....	52
2.2.2.5. Aspectos económicos	53
2.2.2.6. Otras consideraciones	56
2.2.3. Tratamiento por plasma.....	57
2.2.3.1. Aplicaciones.....	58
2.2.3.2. Operación con RSM.....	62
2.2.3.3. Observaciones.....	64
2.2.3.4. Aspectos económicos	66



2.3.	Consideraciones legales	68
2.3.1.	Legislación federal	68
2.3.2.	Legislación estatal.....	73
2.3.3.	Estímulos al desarrollo de tecnologías	75
2.3.4.	Autoridades competentes relacionadas	77
2.3.4.1.	Secretaría de Energía (SENER).....	77
2.3.4.2.	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	79
2.3.5.	Restricciones Legales a la Incineración de los Residuos	80
2.4.	Sustentabilidad.....	84
2.4.1.	La evaluación de la sustentabilidad.....	85
2.4.2.	Herramientas para la evaluación de la sustentabilidad	86
2.4.3.	Métodos del medio ambiente en general.	87
2.4.4.	Métodos de ciclo de vida (LCA).....	88
2.4.5.	Métodos de indicadores de sustentabilidad.	90
2.4.5.1.	Análisis posicional	91
2.4.5.2.	Problema en contexto	93
2.4.5.3.	Análisis de sistemas.....	94
2.4.5.4.	Proceso de jerarquía analítica (AHP).....	94
2.5.	La evaluación tecnológica.....	101
2.6.	El proceso cualitativo	105
2.6.1.	La recolección de datos	107
2.6.1.1.	Entrevistas	108
2.6.1.2.	La muestra.....	109
2.6.2.	Análisis de datos cualitativos	110
2.6.3.	La evaluación de los estudios cualitativos	114
2.6.3.1.	Validez cualitativa	114
2.6.3.2.	Confiabilidad cualitativa	115
2.6.3.3.	Triangulación	117
2.6.3.4.	Transferibilidad.....	119
3.	METODOLOGÍA.....	120
3.1.	Desarrollo del estudio	120
3.2.	Estudio de composición y generación de RS.....	122
3.2.1.	Planificación del estudio	122
3.2.2.	Determinación del tipo de muestro a realizar	123
3.3.	Estudio de caracterización.....	124
3.3.1.	Cuantificación de componentes	126
3.3.2.	Determinación de la generación total.....	127
3.3.2.1.	Estimación por similitud.....	127
3.3.2.2.	Estimación con peso específico propuesto por Tchobanoglous	127
3.3.2.3.	Estimación con peso específico propuesto por Jiménez	128
3.3.2.4.	Estimación con peso específico en camiones de San Quintín	128
3.3.2.5.	Estimación con peso específico y factor de compactación in situ	128
3.3.2.6.	Estimación con peso específico in situ y compactación del 50%	130
3.3.3.	Determinación de la generación per cápita (GPC)	130
3.3.4.	Análisis estadístico de los resultados	131
3.4.	Entrevistas con actores clave	131
3.4.1.	Criterios de selección de los participantes	132
3.4.2.	Instrumentos para la recolección de datos	133
3.4.3.	Contexto de la recolección.....	135
3.4.4.	Procedimiento para la reducción de sesgos personales	135
3.4.5.	Análisis de la información	136
3.5.	Encuestas a la comunidad.....	136
3.5.1.	Instrumento para la recolección de datos	137
3.5.2.	Contexto de la recolección.....	138
3.5.3.	Determinación de la muestra	138



3.6.	Aplicación del AHP.....	138
3.7.	Construcción de la jerarquía.....	139
3.7.1.	Ponderación de criterios	140
3.7.2.	Ponderación de subcriterios.....	143
3.7.2.1.	Social.....	143
3.7.2.2.	Ambiental.....	143
3.7.2.3.	Político.....	144
3.7.2.4.	Económico	144
3.7.2.5.	Insumos	145
3.7.3.	Análisis de sensibilidad.....	145
4.	RESULTADOS	146
4.1.	Manejo de residuos.....	146
4.1.1.	Recolección de residuos	146
4.1.2.	Sitios de disposición.....	147
4.1.3.	Tratamiento final de residuos.....	147
4.1.4.	Pepenadores.....	148
4.2.	Caracterización de residuos	148
4.2.1.	Composición de los residuos	148
4.2.1.	Generación de residuos.....	148
4.2.2.	Generación per-cápita de residuos	150
4.2.3.	Análisis estadístico.....	150
4.3.	Entrevistas a actores clave.....	151
4.3.1.	Transcripción de entrevistas y análisis de la información	152
4.4.	Entrevistas a la sociedad	153
4.5.	Análisis AHP	156
5.	DISCUSIÓN	159
5.1.	Residuos sólidos.....	159
5.1.1.	Manejo de residuos en las comunidades	159
5.1.2.	Generación de residuos	160
5.1.3.	Composición de residuos.....	162
5.1.4.	Análisis estadístico.....	163
5.2.	Entrevista a actores clave.....	164
5.3.	Percepción de la sociedad	166
5.4.	Análisis de la evaluación tecnológica.....	169
5.5.	Aplicación del AHP.....	171
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	174
7.	REFERENCIAS	182

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1.	Generación per-cápita en México (INE)	21
Tabla 2-2.	Reportes de generación diaria de residuos.....	21
Tabla 2-3.	Generación de residuos por países.	22
Tabla 2-4.	Composición porcentual de residuos por zona geográfica.....	23
Tabla 2-5.	Composición porcentual de RSM a nivel internacional	24
Tabla 2-6.	Datos típicos sobre peso específico.	25
Tabla 2-7.	Tamaño de los módulos en rellenos	28
Tabla 2-8.	Clasificación de rellenos por capacidad en México	28
Tabla 2-9.	Clasificación de digestores.....	35
Tabla 2-10.	Plantas anaeróbicas en varios países.	37



Tabla 2-11. Consideraciones de diseño	40
Tabla 2-12. Costos de un sistema de biodigestión.....	42
Tabla 2-13. Proyectos de biodigestión	43
Tabla 2-14. Calidad del gas crudo a partir de mezclas de residuos.....	53
Tabla 2-15. Generación de electricidad y consumo de combustibles en gasificador de 20 kW	54
Tabla 2-16. Costos y rentabilidad de gasificadores supervisados por el BMGP.....	55
Tabla 2-17. Precios de gasificadores de flujo descendente	55
Tabla 2-18. Instalaciones en Japón que operan con antorchas de plasma de Ebara	60
Tabla 2-19. Experimentos de laboratorio recientes sobre pirólisis con plasma térmico.	61
Tabla 2-20. Investigaciones y métodos de evaluación aplicados.....	86
Tabla 2-21 Selección de herramientas de evaluación ambiental.	88
Tabla 2-22 Escala de Medidas de Saaty	96
Tabla 2-23 diferencias entre la ET y la EIA.....	102
Tabla 2-24 Evaluación tecnológica propuesta por Shrader-Frechette	103
Tabla 3-1. Componentes considerados en el estudio.	126
Tabla 3-2. Preguntas aplicadas a informantes clave.	133
Tabla 3-3. Preguntas aplicadas a los actores clave.	134
Tabla 3-4. Formato de registro-resumen de observación general.....	134
Tabla 4-1. Composición de residuos en ambas comunidades	149
Tabla 4-2. Estimación de la generación total de RS.....	149
Tabla 4-3. Generación de residuos per-cápita diaria	150
Tabla 4-4. P-Value de las fracciones analizadas.	150
Tabla 4-5. Registro de observación general.....	151
Tabla 4-6. Transcripción de entrevistas	152
Tabla 4-7. Puntuación de decisión del modelo.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Quema de residuos en el vertedero de San Quintín, Ensenada, B.C	6
Figura 1-2. Localización de los sitios de estudio.	16
Figura 2-1. Tipos de tratamiento de residuos.	31
Figura 2-2. Procesos de conversión térmica y productos.....	31
Figura 2-3. Proceso de digestión anaerobia.	33
Figura 2-4. Digestión anaerobia de alta concentración con fangos y RSM.	34
Figura 2-5. Procesos de gasificación y pirólisis.	44
Figura 2-6. Escalas de aplicación para gasificadores de biomasa.....	46
Figura 2-7. Eficiencia vs Compresión.	52
Figura 2-8. Planta tratadora de residuos por plasma "Slim-fast" de Startech.	67
Figura 2-9. Estructura LCA y preguntas en cada fase.	90
Figura 2-10. Ejemplo de SAM.....	92
Figura 2-11. Diagrama AMOEBA	93
Figura 2-12. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP	96
Figura 2-13. Diagrama del proceso AHP	97
Figura 2-14. Escalas en CDP.....	100
Figura 2-15. Gráficas en CDP.....	100
Figura 2-16. Metodología para un SET de energías alternas (solar y eólico).....	103
Figura 2-17. Seis pasos principales en la evaluación tecnológica.	104
Figura 2-18. Categorización de información.	112
Figura 2-19. Estructuración de información.	113
Figura 2-20. Teorización de información.....	113
Figura 3-1. Procedimiento general del estudio.....	121
Figura 3-2. Procedimiento detallado del estudio.....	122
Figura 3-3. Cuarteo de residuos.	125
Figura 3-4. Esquema de trabajo para investigación de campo.	132
Figura 3-5. Redes de información.....	136
Figura 3-6. Jerarquía para seleccionar tecnologías de tratamiento.	140



Figura 3-7. Método de comparación	140
Figura 3-8. Lista de escalas verbales	141
Figura 3-9. Valuación de criterios	142
Figura 4-1. Red de relaciones entre categorías	153
Figura 4-2. Radar sobre aspectos del manejo de residuos.	154
Figura 4-3. Posición de los residentes sobre reciclaje y tratamientos.	154
Figura 4-4. Resultados de decisión	156
Figura 4-5. Contribución a nivel 2.....	157
Figura 4-6. Contribución a nivel 3.....	157
Figura 4-7. Análisis de sensibilidad, criterio: Insumos	158

En San Quintín y Vicente Guerrero, dos comunidades rurales de Ensenada, Baja California, México, existen problemas de contaminación por ineficiencia en la recolección y tratamiento final inadecuado de los residuos sólidos, tanto de las autoridades sanitarias como de los habitantes. Las dimensiones del problema no son conocidas porque no se ha realizado estudio alguno del sistema de gestión de residuos. El objetivo de esta investigación fue construir un Sistema de Evaluación Tecnológica (SET) sobre tratamientos de residuos con recuperación de energía para indicar cuál tratamiento de residuos sólidos sería el más adecuado para las comunidades rurales de San Quintín y Vicente Guerrero. Este trabajo se realizó bajo un enfoque sistémico usando una metodología de estudio de caso con perspectiva ambiental. La evaluación fue realizada mediante la herramienta Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process ó AHP), y la jerarquía fue construida considerando como criterios los factores social, político, económico y ambiental. Las ponderaciones de las variables y subcriterios se obtuvieron con referencia en estudios de generación y composición de residuos, entrevistas a la comunidad, entrevistas con actores clave y consultas en literatura especializada. Los resultados indican una generación de residuos per cápita promedio de 0.682 kg en San Quintín y de 1.053 kg en Vicente Guerrero. Los principales componentes en ambas comunidades son: residuos alimenticios, plásticos, pañal desechable, papel y cartón. Los actores clave consideran que los aspectos políticos y la sociedad juegan un papel importante en la aprobación de tecnologías. La sociedad no está completamente sensibilizada sobre la problemática ambiental ni cuenta con la suficiente información sobre tratamientos de residuos. De acuerdo a los resultados de este estudio bajo las condiciones



actuales, el digestor sería la tecnología indicada para aplicarse en ambas comunidades. El resultado del análisis de sensibilidad muestra que la variable con mayor sensibilidad es Insumos, con un 41% para el valor de cruzado (crossover). Por tanto, se concluye que el modelo es estable. Con base en los resultados, se puede afirmar que los aspectos legislativos y normativos (criterios políticos) constituyen el principal aspecto a considerar en la selección de una tecnología, más que la factibilidad técnica o económica. En este estudio, el AHP demostró ser una herramienta adecuada para seleccionar tratamientos de residuos bajo enfoque de sistemas complejos y apoyar la toma de decisiones. No obstante, su complejidad se incrementa conforme lo hacen los criterios, subcriterios y opciones. La aplicación de un programa de cómputo como Criterium Decision Plus 3.0 permite que nuevos análisis se realicen con mayor rapidez.

In San Quintin and Vicente Guerrero, two rural communities in Ensenada, Baja California, Mexico, there are contamination problems due to inefficiency in the collection and final disposal of solid waste inadequate, both health authorities and its habitat. The dimensions of the problem are not known because it has not made any study of waste management system. The objective of this research was to build a Technology Assessment System (TAS) on waste treatment with energy recovery to indicate which solid waste would be most appropriate for rural communities in San Quintin and Vicente Guerrero. This work was conducted under a systemic approach using a case study methodology with an environmental perspective. The evaluation was conducted by the tool Analytical Hierarchy Process (AHP), and the hierarchy was built considering as criteria social, political, economic and environmental factors. The weights of the variables and criterion reference were obtained in studies of waste generation and composition, community interviews, interviews and consultations with key stakeholders in literature. The results indicate a waste generation per capita average of 0,682 kg in San Quintin and 1,053 kg in Vicente Guerrero. The main components in both communities are: food waste, plastics, disposable diapers, paper and cardboard. The key players believe that the political and society play an important role in the adoption of technologies. The community is not fully sensitized on environmental issues and has not enough information about waste treatment. According to the results of this study under current conditions, the digester would be the preferred technology for application in both communities. The result of the sensitivity analysis shows that the most sensitive variable is inputs, with 41% for the value of crossover. It is therefore concluded that the model is stable. Based on the results, we can say that the legislative



and regulatory aspects (political criteria) are the main aspect to consider in selecting a technology, rather than technical or economic feasibility. In this study, the AHP proved to be a suitable tool for selecting waste treatment in complex systems approach to support decision-making. However, its complexity increases as do the criteria, subcriteria and options. The application of a computer program as Criterium Decision Plus 3.0 allows new tests to be conducted more quickly.

1. INTRODUCCIÓN

En su concepción más amplia, la calidad de vida es afectada por factores que influyen en el desarrollo humano de una comunidad. Ejemplos serían el empleo, vivienda, acceso a servicios públicos, comunicaciones, urbanización, criminalidad, contaminación del ambiente y otros que conforman el entorno social. De esta forma, la calidad de vida se conceptualiza de acuerdo con un sistema de valores, estándares o perspectivas que varían de persona a persona, de grupo a grupo y de lugar a lugar; así, la calidad de vida consiste en la sensación de bienestar que puede ser experimentada por las personas y representa la suma de sensaciones subjetivas y personales del “sentirse bien” (Velarde y Avila, 2002).

El hombre en su incansable búsqueda por mejorar su calidad de vida ha logrado crear satisfactores y grandes avances tecnológicos pero ha provocado una fuerte degradación del medio ambiente, lo que paradójicamente reduce su calidad de vida. La búsqueda de nuevos materiales resistentes a los rayos solares, calor, sustancias corrosivas, y a diversos agentes atmosféricos, ha provocado en el planeta la aparición de nuevos residuos¹ (algunos de ellos con propiedades tóxicas) que son persistentes o difíciles de eliminar por la naturaleza una vez que concluye su periodo de vida útil. Esta situación pone en riesgo la salud tanto del hombre como de las especies que coexisten con él.

¹ **Residuo:** 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 esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven (LGPGIR, capítulo 5, fracción XXIX)



La producción de materias primas, los procesos de fabricación, el servicio, reparación y mantenimiento y finalmente por lo menos algunas porciones de las mercancías usadas, generan flujos de residuos que deben ser dispuestos adecuadamente para evitar contaminación. Burkhard et al. (1994) enuncian que aunque las mejoras con respecto a la compatibilidad ambiental de los procesos y conceptos de producción para reducir al mínimo la cantidad total de basura están en marcha, aún permanecen remanentes una gran cantidad de basura que puede ser evitada. Mucha de esta basura ocurre como alguna mezcla de metales -orgánicos e inorgánicos- los cuales son difíciles de separar pero contienen cantidades considerables de materiales valiosos o peligrosos. Ejemplos serían los filtros de polvo, catalizadores, escoria, etc.

1.1. Antecedentes

El incremento en la generación de residuos sólidos (RS) ha provocado que su gestión sea hoy en día uno de los problemas más graves que enfrentan los gobiernos. El mal manejo de los RS provoca la contaminación del agua, el aire y la tierra, lo que deriva en peligros para la salud y la pérdida de recursos naturales de importancia social y económica. Los daños al medio ambiente en forma de perturbaciones ecológicas resultan en menos biodiversidad, enfermedad y/o la mortalidad de las poblaciones (Abduli, 1995; Ayininuola y Muibi, 2008).

La planeación y organización de los servicios públicos de recolección en los países en vías de desarrollo se hace de manera muy rudimentaria. Buenrostro y Bocco (2003) exponen que la mayoría de los municipios en México no cuenta con registros sobre generación de RS y no tienen claro su origen y tipo producido en cada área, por lo que sus decisiones son hechas en base a suposiciones e inferencias. En este sentido, el Gobierno de México señaló en el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012:



"El manejo de residuos sólidos se ha caracterizado por la falta de planeación e infraestructura. Aunado a ello, la ausencia de espacios para su disposición ha generado conflictos entre municipios y entidades federativas. Los residuos peligrosos agregan un nivel de complejidad al problema, ya que no se han desarrollado suficientes espacios para su confinamiento. Los residuos depositados inadecuadamente tienden a contaminar los mantos freáticos y a degradar los suelos, haciéndolos inadecuados para cualquier uso" (2007, pág. 238).

De acuerdo a cifras del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI (2006), La generación total de RS urbanos en 2005 llegó a 35 millones 383 mil toneladas. Destacan los productos orgánicos -constituidos principalmente por desechos originados en las viviendas, oficinas, jardines y comercios- con 50% de la generación total, siguiendo en importancia el cartón y el papel con 15%. Respecto a la generación de residuos peligrosos², en el 2000 se reportó una generación de 3,705 846 toneladas.

El Instituto Nacional de Ecología, INE (1997) reportó que en el año 2000 se recolectaba en México el 83% del total de residuos generados (69,886 toneladas) y quedaban dispersas diariamente 14,314 toneladas. Del total generado, poco más del 49% se depositaba en sitios controlados, esto es, 41,258 toneladas por día, lo que significa que 42,942 toneladas se disponían diariamente a cielo abierto, en tiraderos no controlados, tiraderos clandestinos o dispersos de forma inadecuada.

El problema del manejo de los residuos es generalizado en el país y Baja California no es ajena a ello. El Programa Frontera XXI de la EPA (Environmental Protection Agency U.S.) señaló:

² Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio (LGPGIR, Art.5, fracción XXXII).



"La falta de una infraestructura suficiente para el manejo adecuado de los residuos trae aparejado el riesgo de alentar una disposición inadecuada y potencialmente peligrosa de los mismos, así como el que se generen tiraderos ilegales, una práctica que tiene un impacto negativo sobre el ambiente urbano y natural y que representa una amenaza para la salud pública. A pesar de que las industrias asentadas en Baja California generan residuos peligrosos, actualmente no existen instalaciones para el manejo adecuado de estos residuos en el estado. La SEMARNAT ha identificado las siguientes preocupaciones relacionadas con la infraestructura para el manejo de los residuos en Baja California: falta de rellenos sanitarios para residuos municipales; falta de sistemas de tratamiento, neutralización o incineración de residuos peligrosos y tóxicos; falta de motivación y capacitación para promover la minimización de la generación de residuos peligrosos; y falta de un laboratorio oficial equipado para analizar estos residuos" (1997, pág. 5)

Si la gestión de RS en zonas urbanas se considera preocupante, a pesar de contar con mayores recursos e infraestructura, entonces puede pensarse que la situación de los sistemas de gestión de RS en comunidades rurales es grave. El Gobierno Municipal de Ensenada (2008) señaló que la contaminación por mala disposición de los residuos se acentúa en las regiones rurales del municipio ya que en estas regiones el servicio de recolección de basura es ineficiente o incluso inexistente. Buenrostro y Bocco (2003) indicaron que esta problemática se debe -entre otros factores- a la insuficiencia de recursos públicos y privados, al pobre desempeño de las organizaciones que están a cargo de la planeación y operación de los servicios de recolección y a la corrupción en los sistemas públicos de sanidad.

El crecimiento de la población no solo trae como consecuencia el aumento de residuos sólidos, sino también el incremento en la necesidad de energía. La electricidad juega un papel muy importante en el desarrollo de las sociedades modernas y se encuentra entre las fuerzas claves que dificultan la reducción de la pobreza y el crecimiento del sector rural. En sitios donde no existe electricidad, está restringida o tiene mala calidad difícilmente se puede dar desarrollo.



Quintanilla y Fischer (2003) exponen que las actividades relacionadas con la producción y aprovechamiento de la energía tienen mucho que ver con los problemas ambientales que hoy se tienen en nuestro país y en el mundo. Sin embargo, debe reconocerse también que la producción y el uso de energía están íntimamente relacionados con la calidad de vida de un pueblo, y éstas deben considerarse como elementos de especial importancia para el desarrollo de México. Bitrán & Asociados (2006) advierten que el logro de los desafíos de crecimiento y alivio de la pobreza implicará una creciente demanda de energía y proyectan que la demanda energética mundial crecerá dos tercios en los próximos treinta años.

Para asegurar el suministro de la energía eléctrica y cubrir la demanda energética futura, es necesario desarrollar nuevas formas y estrategias de generación. Islas et al. (2007) plantean la necesidad de aumentar el uso de energías alternas en México argumentando que en el 2007 las reservas nacionales probadas de hidrocarburos eran suficientes para el apoyo anual de la producción de petróleo y gas para 9,6 y 8,9 años, respectivamente. Por otra parte, la bioenergía tiene potencial para convertirse en una pieza fundamental en un sistema energético sostenible, contribuyendo no sólo a la estrategia de diversificación de energía del país, sino también a la apropiación de nuevas tecnologías de energía. Puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de nuevos puestos de trabajo en las zonas rurales y la mejora de la distribución de los ingresos.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad, el manejo de los residuos sólidos municipales (RSM) en las comunidades rurales San Quintín y Vicente Guerrero -localizadas en la región sur del municipio de Ensenada, Baja California- no se está desarrollando adecuadamente. En las poblaciones mencionadas, la disposición final de los RS se hace en vertederos a cielo abierto, cañadas, lotes baldíos o canales. En visitas a estas comunidades se pudo apreciar que los residentes dan tratamiento a sus

residuos quemándolos al aire libre en el traspatio de sus casas. Personal del Departamento de Aseo y Limpia (DAL) informó que si los residuos domiciliarios no son recolectados por cualquier motivo, estos son incinerados al aire libre en los patios de las casas o en la calle (no se esperan a la próxima recolección).

Para disminuir los volúmenes de los RS depositados en los vertederos, se realizan quemas a cielo abierto (ver Figura 1-1). La SEMARNAT (2006) señala que la contaminación atmosférica derivada de la quema en estos tiraderos representa un serio riesgo para la salud por la presencia de plásticos, compuestos organoclorados y otros productos químicos de peligrosidad significativa en los residuos que son quemados.



Figura 1-1. Quema de residuos en el vertedero de San Quintín, Ensenada, B.C

A pesar de lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), el municipio no se está responsabilizando por la disposición final de los RS. El manejo de esta etapa se les está dejando a habitantes del ejido (pepenadores), cuya preparación en el manejo de RS es nula. Esto ha ocasionado que no exista ningún control sobre los volúmenes y tipos de residuos que se depositan en el vertedero. Arenas (2008) señala que el problema de los RS en la región no puede dimensionarse debido a la falta de datos sobre las tasas de generación y composición de los residuos entre otros. Datos estimados indican que la generación de residuos



sólidos en las poblaciones de San Quintín, Camalú, Vicente Guerrero y Lázaro Cárdenas es del orden de las 100 t/día.

El municipio de Ensenada no ha aceptado ninguna propuesta tecnológica para el tratamiento de residuos. Por el momento las autoridades municipales solo están teniendo acercamientos con empresas para contar con opciones tecnológicas en cuestión de costos y beneficios, para poder decidir qué es lo que más conviene. Las empresas que proponen tecnologías en México son principalmente españolas y su contacto se hace a través de SEDESOL y SEMARNAT (Arenas, 2008). Al momento las propuestas hechas al municipio son:

- ➡ IPW Group de México S.A. de C.V. en Septiembre del 2005 para la instalación de plantas de incineración de residuos para la ciudad de Ensenada. La propuesta no era muy clara respecto a su ubicación y las ciudades o poblaciones a las que se les pretendían dar servicio. El proyecto consistía en el desarrollo de 300,000m² con 100,000 m² destinados a la operación de 10 módulos de incineración (se estimó éste numero de módulos de acuerdo a la información que se reflejaba por unidad, pero en el proyecto no se especificó), cada uno con capacidad para procesar 180 toneladas diarias de residuos. El equipo propuesto operaría con una temperatura de incineración de 1100 grados centígrados aproximadamente. Los requerimientos de operación para cada módulo eran de 140,000 galones (543,000 litros) de agua y de 300 kW por hora. Se requería de 23,000 litros (6080 galones) por hora para reponer las perdidas del sistema. La temperatura del agua de descarga tendría un incremento de 5 grados centígrados sobre la temperatura del agua que ingresaba al sistema. La generación de cenizas era del orden del 16.25 % y estas tenían que ser tratadas químicamente antes de ser colocadas en un relleno. El costo de la inversión era de \$USD 400 millones. Debido al costo tan elevado del proyecto, a las necesidades de agua y a que la



capacidad de la planta excedía a la generación diaria de residuos del municipio, este no pudo desarrollarse;

- ➡ Una empresa (se omite nombre por confidencialidad) estaba ofertando digestores -de tecnología española- para un tratamiento de 400 toneladas con un costo cercano a los \$MXP 250 millones;
- ➡ La empresa de origen español "Tu Transformas" tuvo un acercamiento con el municipio de Ensenada para tratar de aprovechar los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Naranjo, los residuos del relleno viejo y del relleno sanitario nuevo y hacer cogeneración eléctrica.

Sin embargo ninguna de estas propuestas tecnológicas considera los residuos de las poblaciones de San Quintín y Vicente Guerrero. Las empresas que ofertan estos equipos han expuesto sus proyectos -de gran tamaño- pensando en la ciudad de Ensenada, y han omitido a estas poblaciones más pequeñas como usuarios potenciales.

Respecto al servicio eléctrico, la energía consumida en estas comunidades es generada en las ciudades de Mexicali, Rosarito o Ensenada, con centrales eléctricas que consumen combustibles fósiles que no existen en el estado y son contaminantes. Esto crea un problema de dependencia y un desincentivo a las prácticas de producción de energías limpias.

1.3. Justificación.

A pesar de los desarrollos tecnológicos existentes para el manejo de residuos sólidos a nivel internacional, los sistemas de sanidad en México no tienen suficiente orientación a fin de permitirles tomar decisiones informadas con respecto a la selección de tecnologías y procesos de manejo. Es necesario unir la investigación social y aplicada con el objeto de definir, diseñar e



implementar un plan de manejo que incluya actores políticos, sociales, educativos y de investigación, entre otros (Buenrostro y Bocco, 2003).

La gestión integral de RS en México es aún inmadura y ello se refleja en la contaminación de tierra, ríos, mantos freáticos, contaminación atmosférica, entre otros problemas, como consecuencia de los residuos sólidos. Respecto a la selección de tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos, no existe información pública sobre cómo desarrollan la toma de decisiones los gobiernos, si cuentan con procesos y criterios de selección bien desarrollados, bien documentados, estandarizados, con principios metodológicos e interdisciplinarios para lograr el éxito en el manejo de los residuos.

Instrumentar programas reduciendo todas las variables a una sola dimensión (económica), sacrifica mucha información relevante y en ocasiones indispensable para la toma de decisiones. La gestión integral de residuos es un problema complejo por el gran número de variables que entran en juego. Por ello, es conveniente contar con una herramienta desarrollada bajo un enfoque sistémico en la que se considere la mayor parte de variables que jueguen un papel relevante, para coadyuvar en la toma de decisiones.

Experiencias infructuosas sobre la aplicación de tecnología para el tratamiento de residuos son expuestas por el Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana BID-OP (1997):

- Debido a la falta de terrenos, su alto costo o por la cada vez más exigente legislación para la preservación del ambiente, muchos países desarrollados adoptaron la incineración y el compostaje de sus RSM como métodos de tratamiento. Estas tecnologías también fueron adoptadas por varias ciudades de América Latina y el Caribe con resultados casi siempre



desalentadores debido a que faltaron los análisis técnicos, institucionales y económicos para establecer la justificación y factibilidad de las inversiones;

- En América Latina la producción de composta mediante procesos simplificados, como son el apilado, los digestores rotatorios y últimamente la lombricultura, se han ido abandonando por sus costos. La falta de estudios de factibilidad y el reducido mercado local para comercializar el producto fueron las principales causas del fracaso de estas instalaciones. Las municipalidades no podían seguir subsidiando los altos costos operacionales de las plantas, aunque ecológicamente eran aceptables, sobre todo si tenían alternativas menos costosas de disposición final.

Desde una perspectiva sustentable, se debe elevar la calidad de vida manteniendo, enriqueciendo y transformando positivamente los ecosistemas mediante tecnologías adecuadas a estos fines (Quintanilla, 2006). Huang y Tang (2007) exponen que para aliviar parte de la crisis energética y del deterioro ambiental, llega a ser imperativo el uso de tecnologías apropiadas para recuperar energía de fuentes no convencionales como los desechos orgánicos.

Entre las principales fuerzas promotoras para la recuperación de energía de los residuos, se encuentran los acuerdos internacionales con respecto a las emisiones de Gases de Efecto de Invernadero (GEI). Los vertederos son grandes fuentes de emisiones de metano a la atmósfera, cuyo potencial de calentamiento atmosférico es más de veinte veces mayor que la de dióxido de carbono (Verma, 2002). Esto tiene una importancia significativa para la toma de decisiones, porque la aplicación de cualquier política destinada a reducir el metano tendría un impacto inmediato en las emisiones de GEI y los beneficios de las iniciativas serían evidentes en el corto-mediano plazo (Batoool y Chuadhry, 2008). Muchas dependencias y empresas de servicios públicos están muy interesadas en obtener créditos (bonos de carbono) por la reducción de las emisiones de GEI. En Febrero de 2007, Aguascalientes se convirtió en el primer municipio mexicano en verse



beneficiado económicamente por bonos de carbono al recibir \$USD 100,000 por la venta de sus emisiones (Planeta Azul, 2007).

La selección de la combinación de opciones de manejo de los residuos y las prioridades que deben asignárseles, requieren hacerse con base en diagnósticos. Estos permitirán conocer las situaciones que privan en cada localidad respecto del tipo y volúmenes de residuos que se generan, la infraestructura disponible o accesible para su manejo, la cultura, recursos disponibles y los mercados de los materiales secundarios, entre otros.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (1996) expuso que la idoneidad de las distintas técnicas de eliminación depende en gran medida del tipo y la cantidad de producto que ha de eliminarse. Una determinada técnica puede ser aceptable para un grupo de productos, pero totalmente inadecuada para otro. Esto significa que es esencial examinar siempre la combinación de tecnología y producto que se desea eliminar estudiando cada caso por separado.

Elaborar un diagnóstico de la situación de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (GIRSM) permite conocer y definir los problemas relacionados -desde la generación hasta la disposición final de los RSM- y apoya una correcta planeación de las acciones entre los sectores y actores involucrados en el manejo de este tipo de residuos. Esta información es importante para la toma de decisiones porque:

- ➡ Los recursos para el tratamiento de residuos son limitados y su ejercicio tiene que ser eficaz y óptimo;
- ➡ Si no se seleccionan las tecnologías adecuadamente, los problemas ambientales y sociales persisten y se agravan por la falta de recursos;



- ➡ Los recursos empleados por el gobierno para el tratamiento de residuos son del pueblo, y este tiene derecho a saber lo que se hace con sus recursos.

Por lo expuesto anteriormente, se analizaron tecnologías con capacidad para recuperar energía de los residuos y con costos de inversión bajo, medio y alto para ofrecer alternativas a los tomadores de decisiones sobre tratamiento de residuos para las comunidades de San Quintín y Vicente Guerrero. De acuerdo a las revisiones en la literatura científica, se seleccionaron las siguientes tecnologías como posibles opciones para las comunidades bajo estudio:

- Digestores de una etapa. Sus costos de construcción son más bajos con respecto a los de etapa múltiple, además que presentan menor complejidad en su operación;
- Gasificador de flujo descendente (downdraft). Esta tecnología está suficientemente probada en varios países tales como Sudáfrica, Estados Unidos, China, Alemania y Yugoslavia (Perales, 2002). Además de ser la más recomendable y de menor costo en su construcción para potencias de generación de hasta 1 MW;
- Plasma de arco no transferido. Esta tecnología ha sido ampliamente probada y aceptada para el tratamiento de residuos sólidos en países como Japón y Estados Unidos (Leal, 2004), sin embargo en México no se ha aplicado. Sólo existió una planta piloto en Monterrey que actualmente está desmantelada.

El propósito de un Sistema de Evaluación Tecnológica (SET) es proveer de información imparcial, competente, concerniente a los efectos ambientales, físicos, biológicos, económicos, sociales y políticos de las aplicaciones de una tecnología (Shrader-Frechette, 1985). Por ello, ésta investigación -mediante un estudio de caso con perspectiva ambiental y enfoque multimodal- buscó construir un Sistema de Evaluación Tecnológica (SET).



Los resultados obtenidos aportan información sobre (a) tipos de residuos generados, cantidades generadas; (b) evaluación de tecnologías bajo perspectiva multimodal; y (c) información de la sociedad y actores clave sobre su conciencia ecológica y postura hacia el tratamiento de residuos con recuperación de energía.

1.4. Hipótesis

Las condiciones actuales y futuras de los residuos sólidos en las comunidades de San Quintín y Vicente Guerrero -respecto a sus volúmenes de generación y a sus características- la sociedad y las condiciones políticas favorecen la aplicación de tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos con recuperación de energía (digestores, gasificadores y plasma) que sean viables y sustentables en comparación con el método tradicional empleado en México (relleno sanitario) y con el método actual de manejo (tiradero a cielo abierto).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Elaborar un Sistema de Evaluación Tecnológica (SET) sobre tratamientos de residuos con recuperación de energía e indicar cuál tratamiento sería el más adecuado a las comunidades rurales de San Quintín y Vicente Guerrero.

1.5.2. Objetivos específicos

- 1) Realizar estudios de caracterización de residuos sólidos en las comunidades objeto de investigación;
- 2) Analizar los procesos de toma de decisión en los tres niveles de gobierno en materia de manejo de residuos;



- 3) Conocer la percepción de los tomadores de decisiones respecto a la problemática de los residuos sólidos, e identificar su conocimiento y postura respecto a los digestores, gasificadores de flujo descendente e incineradores de plasma, en la solución de problemas de residuos sólidos y energía;
- 4) Conocer la percepción de la comunidad respecto a la problemática de los residuos sólidos, así como el grado de aceptación hacia la utilización de los digestores, gasificadores de flujo descendente e incineradores de plasma;
- 5) Evaluar la factibilidad social, ambiental y económica de la aplicación de las tecnologías de biodigestión, gasificación y plasma en las comunidades de San Quintín y Vicente Guerrero.

1.6. Preguntas de investigación.

- ¿Qué tipo de tratamientos de RSM se están aplicando en México, el estado y la región?
- ¿Qué beneficios económicos, sociales y ambientales se han tenido bajo la forma actual de manejo de residuos?
- ¿Qué criterios se emplean para decidir sobre un mecanismo de tratamiento de RS?
- ¿Qué factores sociales, políticos y ambientales impiden o favorecen la puesta en marcha de tecnologías con recuperación de energía?
- ¿Qué indicadores están empleando para conocer el impacto de la tecnología para el tratamiento de residuos?
- ¿Cómo percibe la comunidad su responsabilidad en el manejo de residuos?
- ¿Cuál es el grado de conocimiento y aceptación por parte de la comunidad de los sistemas de tratamiento de residuos bajo análisis?



1.7. Delimitaciones

1.7.1. Geográfica

La investigación se realizó en las poblaciones San Quintín y Vicente Guerrero, pertenecientes a la Región de San Quintín, en el Municipio de Ensenada, Baja California.

1.7.2. De conocimiento

Esta investigación versa sobre las implicaciones que tendría para la sociedad, el ambiente y el gobierno la aplicación de tres diferentes tecnologías para el manejo y tratamiento de residuos sólidos municipales. Respecto a los residuos, solamente se incluye la caracterización de los mismos y su tasa de generación.

1.8. Usuarios potenciales

El producto de esta investigación (SET) podría ser útil para la toma de decisiones en dependencias como la SEMARNAT, la SEDESOL, la Secretaría de Protección al Ambiente (gobierno estatal) y el Departamento de Ecología (gobierno municipal).

1.9. Descripción de los sitios de estudio

Este estudio se realizó en tres comunidades rurales del Estado de Baja California, al Norte de México: San Quintín, Lázaro Cárdenas y Vicente Guerrero (Figura 1-2). Debido a que las dos primeras comunidades pertenecen a la misma delegación, son contiguas y comparte el mismo sistema de recolección y vertedero, se decidió considerarlas como una sola. Se determinó nombrarlas como San Quintín porque ésta comunidad es cabecera de Delegación y de Administración Regional.

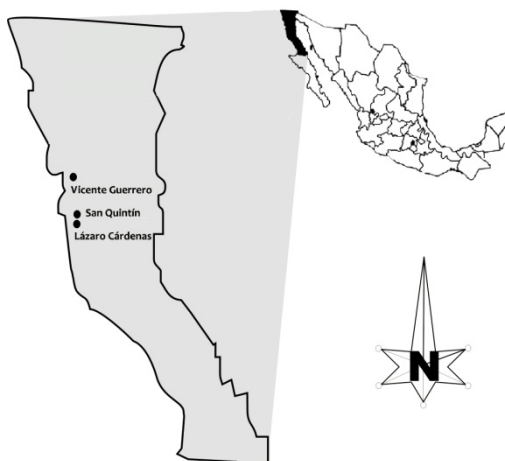


Figura 1-2. Localización de los sitios de estudio.

Geográficamente, San Quintín y Vicente Guerrero se localizan en $30^{\circ}33'37''$, $-115^{\circ}56'33''$ y $30^{\circ}43'47''$, $-115^{\circ}59'19''$ respectivamente, a una altitud de 30 metros sobre el nivel del mar (msnm) con una temperatura media anual de 16.61°C . La precipitación total anual en la región oscila entre los 100 y 200 mm. El número de habitantes en San Quintín es de 19,800 y de 10,632 en Vicente Guerrero. La principal actividad económica en ambas comunidades es la producción agrícola, lo que origina una población flotante entre los 50,000 y 60,000 habitantes que proviene principalmente de Estados del sur de México (Oaxaca, 60.3%; Michoacán, 9.5%; Sinaloa, 4.7% y otros, 11.9%) y que fluctúa dependiendo de la época del año y la cantidad de trabajo en los campos agrícolas (IMIP, 2007; SEDESOE, 2008).

1.10. Bosquejo Metodológico

Para la evaluación de las tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos se empleó un proceso multimodal con un diseño de dos etapas en paralelo. El resultado se presenta como una combinación de datos cuantitativos y cualitativos con análisis múltiples en un solo documento. La metodología en detalle se explicará en el capítulo 3.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos sólidos

El incremento en la generación de residuos demanda alternativas de tratamiento, nuevos equipos y tecnología. Para hacer una selección adecuada, es necesario conocer las características cualitativas y cuantitativas intrínsecas de los residuos así como las situaciones que prevalecen en cada localidad, respecto los volúmenes de residuos generados, la infraestructura disponible o accesible para su manejo y los mercados de los materiales secundarios, entre otros.

La eficacia y eficiencia de los tratamientos y equipos de manejo de RS se ven afectadas por la composición de los mismos, del contenido de humedad, los niveles de materia inorgánica, entre otros parámetros. Por ello, es importante conocer tales parámetros. Diversos investigadores (Gómez et al., 2008; Hristovski et al., 2007; Buenrostro y Bocco, 2003) indican que la caracterización de RS constituye el primer paso para la implementación exitosa de un sistema de manejo integral de residuos. Eggleston et al., (2006) exponen que los datos de un estudio de caracterización también pueden ser empleados para conocer las estimaciones de gases de efecto de invernadero, entre otros usos.

El desarrollo de estudios de caracterización en México es importante porque la información existente es limitada. De acuerdo con SEDESOL (2006), las autoridades municipales tienen, en general, un escaso conocimiento de los RS que genera la población, por lo que los datos que



manejan en cuanto a la cantidad y composición de los mismos son sólo estimaciones que realizan los departamentos de Aseo Urbano, sin basarse en estudios que sigan una metodología particular.

2.1.1. Caracterización de residuos.

Los estudios de de generación de RS son esenciales para conocer la composición física y química de los residuos, así como el volumen generado. Estos estudios arrojan información para la planificación y manejo de los residuos en su aprovechamiento y disposición final (Zeng et al., 2005; Ojeda, 2005).

Los datos sobre generación de RS no pueden ser generalizables entre regiones debido a que los residuos varían en composición y volumen generado de un sitio a otro. Esto se debe principalmente a las diferencias en los patrones de consumo, composición de la población, la estación del año, el día de la semana, estatus social, económico y cultural, así como la composición de la familia (Hristovski et al., 2007; Ojeda, 2006; SEDESOL, 2006; Buenrostro y Bocco, 2003; Ojeda-Benítez et al., 2000; William, 1998; INE Instituto Nacional de Ecología, 1997).

La composición de los RSM es un espejo de los patrones de consumo, hábitos alimenticios, estructura social, entre otros, de una sociedad. Así, en las áreas donde los ingresos son bajos, los principales componentes de los RSM son fácilmente biodegradables (residuo de alimentos), mientras que esta fracción es fuertemente reducida en ciudades altamente desarrolladas (Ludwig et al., 2003; Bernache-Pérez et al., 2001)

El Instituto Nacional de Ecología, INE (1999) expone que deben observarse las características de los RSM que se generan, no sólo en la cantidad sino también en su composición de temporada a temporada. Mientras que en el verano se presenta un aumento en la cantidad de materia orgánica debido a la disponibilidad de una serie de frutas y verduras, en el invierno ésta se



reduce hasta en un 10%, aumentando los materiales de más lenta degradación. Ludwig et al., (2003) exponen que por el tipo de clima, en el sur de China se consumen muchos tipos de sopas mientras que en el norte la comida es relativamente seca. Como resultado, la humedad de los RSM en el norte es de alrededor del 30-50%, en comparación con el que en el sur, que es de aproximadamente 40-60 %. La humedad de los RSM en el norte desaparece rápidamente debido al clima seco, sin olor fuerte o grave por la descomposición. Por el contrario, los RSM en el sur se degradan muy rápidamente y producen fuertes olores y lixiviados.

Para hacer un estudio de caracterización, se requiere analizar una muestra representativa de los residuos. Esta podría ser a) la carga de un camión que procede de una ruta típica de recogida, en un día laborable, en una zona residencial; b) la mezcla de un foso de almacenamiento para una incineradora; y c) la mezcla del foso de descarga de una trituradora. Para asegurar que los resultados obtenidos son representativos, tiene que ser examinado un muestreo suficientemente grande. Se ha encontrado que las medidas hechas a partir de un muestreo del tamaño de unos 90 kg no varían significativamente de las tomadas en muestreos de hasta 770 kg sacados de la misma carga de residuos (Tchobanoglous et al., 1994).

2.1.2. Generación per cápita de residuos

La generación de residuos per-cápita (GPC) se obtiene de la relación entre los RS totales generados y el número de habitantes, en un lapso de tiempo. Puede indicarse como la cantidad de kg de RS que produce cada habitante por día en una población determinada ($\text{kg-hab}^{-1}\text{-día}^{-1}$) o como la cantidad de kg generados por habitante anualmente ($\text{kg-hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$). Debido a que este valor constituye una media muestral, representa un valor aproximado.

La GPC no es generalizable porque no depende únicamente del número de habitantes de una población, sino que es afectada por aspectos económicos, ambientales, políticos y sociales,



tales como ingreso per-cápita, cultura, hábitos de consumo, conciencia ecológica, nivel de desarrollo, estación del año, tamaño de la población, tipo de vivienda, entre otros aspectos (Ojeda-Benítez et al., 2006; Bernache-Pérez et al., 2001; William, 1998). Así, se puede esperar que la GPC entre un país desarrollado y uno en vías de desarrollo difiera significativamente.

Dos enfoques son generalmente adoptados para la estimación de la cantidad y composición de residuos: cuestionarios y/o análisis directo de residuos. El primero es aplicado a los generadores de residuos y el segundo en el sitio de la producción de residuos, en la instalación de tratamiento de residuos o en un espacio destinado para el análisis.

El método del cuestionario consiste en distribuir un cuestionario a una serie de empresas, con preguntas relativas al tipo residuos, cantidades generadas y conocer si se realizan actividades de reciclaje. Sobre este método, William (1998) señala que los sistemas de adquisición de datos que se basan en los cuestionarios pueden no ser confiables, debido a que la falta de registros, una baja tasa de respuesta y la falta de respuesta al cuestionario puede inducir a un sesgo de respuesta a fin de que las empresas puedan ser vistas a tener una mejor gestión de los residuos y sistemas de presentación de informes que no responden. Un caso es reportado por Buenrostro (2001), quien encontró en una comparación de los datos sobre generación de RS obtenidos por encuesta y por pesado del camión, una subestimación del primero de alrededor del 36%. Atribuyó esta diferencia que la mayoría de los locatarios vacilaba en contestar la cantidad de RS que ellos estimaban producir argumentando temor a un aumento de impuestos, que se piense que son más sucios y con ello, que se les suspendiera la concesión de su permiso.

El INE (1997), con base en la información disponible relativa a la GPC de RSM, calculó la generación total para 118 localidades en México (ver Tabla 2-1). Para aquellas localidades que no contaban con un estudio o información confiable al respecto, los datos se estimaron mediante



inferencia, tomando en consideración el clima, la actividad o actividades preponderantes y la zona y/o región donde se localizan.

Tabla 2-1. Generación per-cápita en México (INE)

Región	1997	2000	2005	2010
Frontera	0.92	0.96	1.05	1.16
Norte	0.85	0.94	1.03	1.12
Centro	0.95	1.15	1.27	1.40
Occidente	0.86	0.91	1.00	1.10
Sureste	0.89	0.98	1.07	1.16

Fuente: INE, 1997

En las tablas siguientes, se presentan algunos datos de generación per cápita de residuos en diferentes partes del país (Tabla 2-2) y en el mundo (Tabla 2-3).

Tabla 2-2. Reportes de generación diaria de residuos

Investigador	Hallazgos	Sitio
Bernache-Pérez et al, 2001	Producción per cápita de 0.508±0.151 kg	Guadalajara, México
H. Gaxiola en Ojeda, 2003	Producción per cápita de: - 0.434 kg para estrato bajo. -0.507 kg para estrato medio. -0.562 kg para estrato alto	Cd. de México, México
Ojeda-Benítez et al, 2003	Producción per cápita de 0.592 kg en estrato socioeconómico medio.	Mexicali, México
SEDESOL, 2006	Producción per cápita de: - 1.328 kg para zonas metropolitanas. -1.003 kg para ciudades medias. -0.850 kg para localidades urbanas pequeñas. -0.435 kg para localidades semirurales y rurales. -0.911 kg por habitante en México.	República Mexicana
SEDESOL, 2006	Producción per cápita de: - 0.882 kg para Zona Centro. -1.048 kg para Frontera Norte. -0.774 kg para Zona Norte. -0.697 kg para Zona Sur -1.414 kg para Distrito Federal.	República Mexicana
Gómez et al, 2008	Producción per cápita de: - 0.599 kg para estrato bajo. -0.697 kg para estrato medio. -0.732 kg para estrato alto	Chihuahua, México



Tabla 2-3. Generación de residuos por países.

Región	Generación de RSM Rango 1, 2, 3 (ton/hab/año)
Asia	
Asia Oriental	0.37
Asia Central-Sur	0.21
Asia Sureste	0.27
África	0.29
Europa	
Europa Oriental	0.38
Europa del Norte	0.64
Europa del Sur	0.52
Europa Occidental	0.56
América	
Caribe	0.49
América Central	0.21
Sudamérica	0.26
Norteamérica	0.65
Oceanía	0.69
¹ Los datos se basan en el peso de los residuos húmedos. ² Para obtener la producción total de residuos en el país, los valores per cápita se multiplicarán con la población cuyos residuos se recogen. En muchos países, especialmente los países en desarrollo, esto abarca sólo la población urbana. ³ Los datos son por defecto de datos para el año 2000, aunque para algunos países el año para el cual los datos son aplicables no se dio en la referencia, o datos para el año 2000 no estaban disponibles.	

Fuente: Eggleston et al., 2006

2.1.3. Composición de los residuos

A medida que las ciudades han desarrollado procesos industriales, la composición de sus residuos ha variado, pasando de ser densos y casi completamente orgánicos a ser voluminosos, parcialmente no biodegradables y con porcentajes crecientes de materiales tóxicos, lo que dificulta su manejo. Los porcentajes más altos de residuos los representan los alimentos, papel y cartón y los plásticos, junto con los residuos de jardín (SEDESOL, 2006; Ojeda, 2006). Para el año 2004 en México el 53% de los RSM eran de tipo orgánico, en tanto que el 28% son potencialmente reciclables como el papel y cartón (14%), vidrio (6%), plásticos (4%), hojalata (3%) y textiles (1%). El 19% restante son residuos de madera, cuero, hule, trapo y fibras diversas, materiales parcialmente reciclables aunque con mayor grado de dificultad. Actualmente se recupera sólo un porcentaje menor al 50% del señalado potencial para el reciclaje (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2008; Gutiérrez Avedoy, 2006)



Las variables que determinan la generación de RS inciden diferencialmente en cada región. Ello se ha demostrado en diversos estudios para determinar el efecto de las variables socioeconómicas, tales como el ingreso per cápita en países con diferente nivel de desarrollo económico (Buenrostro, 2001). El INE (1997) expone que la composición y presencia de determinados subproductos dentro de los RSM (sobre todo domiciliarios), está más determinada por aspectos culturales y patrones de consumo, por la época del año y por los festejos y/o eventos particulares de cada localidad, que por la actividad económica de la región y/o zona donde se localizan. En México, la composición de los RSM no es homogénea, sino que responde a la distribución de hábitos de consumo y poder adquisitivo de la población (Jiménez, 2002; INE, 2001), como se ve en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Composición porcentual de residuos por zona geográfica.

Subproducto	Frontera norte	Norte	Centro	Sur	D.F.
Cartón	3.973	4.366	1.831	4.844	5.360
Residuos finos	1.369	2.225	3.512	8.075	1.210
Hueso	0.504	0.644	0.269	0.250	0.080
Hule	0.278	0.200	0.087	0.350	0.200
Lata	2.926	1.409	1.700	2.966	1.580
Material ferroso	1.183	1.476	0.286	0.399	1.390
Material no ferroso	0.226	0.652	0.937	1.698	0.060
Papel	12.128	10.555	13.684	8.853	14.580
Pañal desechable	6.552	8.308	6.008	5.723	3.370
Plástico película	4.787	5.120	1.656	1.723	6.240
Plástico rígido	2.897	3.152	1.948	1.228	4.330
Residuos alimenticios	26.972	21.271	38.538	16.344	34.660
Residuos de jardinería	16.091	19.762	7.113	26.975	5.120
Trapo	1.965	2.406	0.807	2.157	0.640
Vidrio de color	2.059	0.934	4.248	0.599	4.000
Vidrio transparente	4.590	5.254	5.051	3.715	6.770
Otros	11.500	12.267	12.326	14.102	10.410
Total	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

Fuente: INE (2001)

La composición porcentual de los RSM en diferentes países se presenta en la Tabla 2-5. Buenrostro y Bocco (2003) exponen que la composición de residuos sólidos en países en desarrollo es similar, sin embargo, existen diferencias geográficas, climáticas, económicas, raciales, culturales, sociales y demográficas. Estas variables se han reportado como factores determinantes de la cantidad y la composición de los residuos sólidos.



Tabla 2-5. Composición porcentual de RSM a nivel internacional

Componente	USA	Francia	México	Colombia
Papel y cartón	40	35	14	22
Plásticos	8	7	6	5
Metales	9	5	3	1
Textiles	-	5	1	4
Vidrio	7	12	7	2
Residuos alimenticios	18	21	32	56
Residuos de jardinería	7	-	10	10
Otros	11	15	27	-

Fuente: Jiménez (2002)

La importancia en el conocimiento de la composición de los RS radica en permite determinar la factibilidad de proyectos para la clasificación de subproductos, para su venta en centros de acopio, empresas recicladoras o industrias de tratamiento de residuos (Ojeda-Benítez et al., 2006).

2.1.4. Propiedades de los residuos sólidos

Las propiedades de los residuos deben de ser consideradas para el diseño de un sistema de gestión integral. Existen propiedades físicas y químicas de los residuos que deben de tomarse en consideración para diseñar sistemas de recolección, seleccionar tratamiento de residuos, establecer políticas sobre mercados secundarios, entre otros. Algunas de estas propiedades se exponen a continuación.

2.1.4.1. Peso específico (ρ)

Tchobanoglous et al. (1994) definen el peso específico (ρ) como el peso de un material por unidad de volumen. Este peso puede referirse a valores de residuos sin compactar, en contenedores o compactados. Su conocimiento es necesario para tener una idea de la masa total y el volumen de los residuos que son manejados.



La reducción en volumen de los RS es una consideración importante en la recolección, transporte y disposición y puede ser expresada en términos de un rango de compactación así como en porcentaje. El desempeño del equipo de compactación (en camiones recolectores) es evaluado por el porcentaje de reducción de volumen y el rango de compactación (Tchobanoglous et al., 1994). Shah (2000) indica que el rango de compactación se estima con la siguiente ecuación:

$$\text{Reducción de volumen (\%)} = 100 \left(1 - \frac{V_f}{V_i} \right)$$

donde V_i es el volumen inicial (m^3) de los residuos antes de la compactación y V_f es el volumen final (m^3) después de la compactación. Entonces el rango de compactación es definido como (V_f/V_i) .

Los RSM de acera tienen un ρ de aproximadamente 118.6 a 148.25 kg/m^3 . Con esta densidad, se requiere un mayor número de viajes para retirar los residuos, ya que los vehículos de recolección se llenan muy rápidamente. La mayoría de los camiones compactadores pueden compactar los residuos por un factor de dos o más. Los RS son alimentados a través de una tolva y cuando esta se llena, el pistón hidráulico es activado. La densidad de los residuos es incrementada por la acción del pistón (SEDESOL, 2006; Shah, 2000). En la Tabla 2-6 se expone una relación de datos con valores típicos.

Tabla 2-6. Datos típicos sobre peso específico.

Tipo de residuo	Peso específico kg/m^3		Contenido en humedad, porcentaje en peso	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Urbano				
En camión compactador	178-451	297	15-40	20
En vertedero				
Medianamente compactados	362-498	451	15-40	25
Bien compactados	590-742	600	15-40	25
Comerciales				
Residuos de comida (húmedos)	475-950	540	50-80	70

Fuente: Tchobanoglous et al. (1994)



Los componentes de los RSM varían con la localización, estación y tiempo de almacenamiento, por lo que los valores "típicos" ρ_p deben seleccionarse cuidadosamente. Tal como se entregan en vehículos de compactación, los RSM varían desde 177.9 hasta 474.4 kg/m³. Un valor típico es aproximadamente 296.5 kg/m³. En camiones recolectores sin compactación, ρ_p es de 88.95 kg/m³, mientras que en una camioneta es de 59.3 kg/m³. Estos valores asumen que cada vehículo de recolección está lleno (Shah, 2000; Tchobanoglous et al., 1994). Jiménez (2002) expone que en México, para los residuos domésticos después de la recolección y antes del sitio de transferencia, ρ_p oscila entre 150 y 350 kg/m³, siendo 250 el valor típico.

2.1.4.2. Contenidos de humedad

El contenido de humedad de los RS es un parámetro importante en la determinación de valor calorífico, densidad y lixiviados de un relleno sanitario (Shah, 2000). En los vertederos, la cantidad de humedad afecta la descomposición de los residuos y con ello la generación de biogás. El contenido en humedad óptimo para la conversión de la materia orgánica biodegradable de los RSM es del orden del 50-60% (Tchobanoglous et al., 1994).

El contenido de humedad de los RS normalmente se expresa de dos formas: el método del peso-húmedo y el método del peso-seco. El método del peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de residuos sólidos. En forma de ecuación, el contenido de humedad peso-húmedo se expresa de la forma siguiente (Tchobanoglous et al., 1994):

$$M = \left(\frac{w - d}{w} \right) \cdot 100$$

donde: M= contenido de humedad, porcentaje; w= peso inicial de la muestra según se entrega (kg) y d= peso de la muestra después de secarse a 105 °C (kg)



En general, los desechos urbanos contienen entre 15 y 40% de humedad, dependiendo de la composición de los desechos, la estación del año y las condiciones climáticas (Jiménez, 2002; Shah, 2000; Tchobanoglous et al., 1994).

2.1.4.3. Cenizas

Las cenizas son un residuo sólido resultante de la combustión de productos carbonáceos. Pueden contener combustible parcialmente quemado aunque para fines analíticos se presupone una combustión completa (NOM-AA-091-1987). El porcentaje de cenizas en base seca se calcula con la siguiente fórmula (NOM-AA-018-1984):

$$C = \frac{G3 - G1}{G2 - G1} \times 100$$

en donde: C = Porcentaje de cenizas en base seca; G1 = Peso del crisol vacío en g; G2 = Peso del crisol más la muestra seca en g, y G3 = Peso del crisol más la muestra calcinada en g

2.1.5. Disposición de residuos

2.1.5.1. Rellenos sanitarios y vertederos

Históricamente, los rellenos sanitarios (RESA's) han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la disposición de RS en el mundo. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, del reciclaje y de las tecnologías de tratamiento, los RESA's siguen siendo un componente importante dentro de la estrategia para la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) (Tchobanoglous et al., 1994).

De acuerdo con SEDESOL (1999), un RESA es el lugar donde se depositan los desechos generados por la población en general. En algunos casos en estos sitios se realizan actividades de clasificación, compactación y procesamiento. Su instalación debe ubicarse fuera de la mancha urbana y se considera indispensable en localidades a partir de 2,500 habitantes, recomendando



para ello módulos de terrenos con un área en m²/año de 112,000 (>500,001 hab), 56,000 (100,001 a 500,000 hab) y 1,000 (2,500 a 50,000 hab), constituidos por caseta de control, bodega de herramienta, letrina, estacionamiento de maquinaria y zona de descarga y compactación de basura.

Tabla 2-7. Tamaño de los módulos en rellenos

Rango de población (habitantes)		(+) de 500,001	100,001 a 500,000	50,001 a 100,000	10,001 a 50,000	5,001 a 10,000	2,500 a 5,000
Dosificación	Cantidad de m ² /año requeridas	55,500	11,111 a 55,555	6,250 a 12,500	1,428 a 7,143	833 a 1,667	500 a 1,000
	Módulo tipo recomendable	112,000	56,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Cantidad de módulos recomendables	1 a (+)	1	6 a 12	1 a 7	1 a 2	1
	Población atendida (habitantes por módulo)	1,008,000	504,000	8,000	7,000	6,000	5,000

Fuente: SEDESOL (1999)

Para su ubicación se recomienda utilizar accidentes topográficos (depresiones o cañadas), para que posteriormente puedan utilizarse como áreas verdes y/o deportivas. Estos equipamientos son atribución específica de los gobiernos municipales. En México, estas instalaciones se regulan con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 y se categorizan de acuerdo a la cantidad de toneladas de residuos sólidos urbanos y de manejo especial que ingresan por día, de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 2-8. Clasificación de rellenos por capacidad en México

Tipo	Tonelaje recibido (Ton/día)
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

Fuente: NOM-083-SEMARNAT-2003



2.1.5.2. Pepenadores

El INE (2001) indica que en las diferentes etapas del manejo de los RSM (fuentes de generación, plantas de aprovechamiento, camiones recolectores y en los sitios de disposición) se encuentran personas que no son parte de la administración municipal responsable de su gestión y que no pertenecen al sector formal de la economía. Estos grupos de trabajadores del sector informal que reciben diferentes nombres dependiendo del país en que se encuentren: pepenadores y burreros (México), catadores y «triadores » (Brasil), cirujas (Argentina), scavenger (países de habla inglesa).

La actividad de los pepenadores es de gran importancia ambiental, ya que ellos recuperan exitosamente recursos y los reintegran en el proceso industrial y económico. Buenrostro y Bocco (2003) han indicado que estos grupos son capaces de recuperar y reciclar grandes cantidades de materiales; tan grandes son estas cantidades que superan los obtenidos en los países desarrollados. Este hecho demuestra la necesidad de incluir esos grupos en el proceso de toma de decisiones con respecto al manejo de RSM.

A pesar de su importancia en la recuperación de materiales, estos grupos operan en condiciones muy desfavorables. El INE (1999) expone que sus condiciones de trabajo están muy por debajo de cualquier estándar laboral, no cuentan por lo general con ningún tipo de prestación social y las condiciones de trabajo son por demás insalubres. Buenrostro y Bocco (2003) expresan que las condiciones de manejo de RS en las que operan estos grupos dan lugar a contradicciones ambientales y sociales que no permiten a estos grupos mejorar su nivel económico. El hecho es que, estas personas se ven obligadas a vender los materiales recuperados a otros por muy poco beneficio, y éstos en última instancia, son los que revenden estos materiales y obtienen un mayor beneficio económico.



El INE (2001) señala que la participación del sector informal en el manejo de los RSM prácticamente está presente en todos los países en desarrollo, predominantemente en las zonas urbanas, donde existe un mercado para la venta de los subproductos seleccionados. Su participación es de alta importancia por el número de personas que ocupa. Existen varios grupos de pepenadores en México: a) Los que trabajan por cuenta propia y que algunas veces eligen un líder de su grupo para representarlos frente a terceros; b) Los que son empleados de un cacique o líder; c) Quienes trabajan en tiraderos municipales; d) Aquellos que trabajan en su propio tiradero clandestino; e) Los que forman parte de un sindicato independiente.

2.2. Tecnologías para el tratamiento de residuos con recuperación de energía

El Instituto Nacional de Ecología (INE) estableció que:

"El manejo integral y sustentable de los RSM combina flujos de residuos, métodos de recolección, sistemas de separación, valorización y aprovechamiento del cual derivan beneficios ambientales y económicos que resultan en la aceptación social con una metodología versátil y práctica que puede aplicarse a cualquier región. Esto puede lograrse combinando opciones de manejo que incluyen tratamientos que involucran el reuso, reciclaje, compostaje, biogasificación, tratamiento mecánico-biológico, pirolisis, incineración con recuperación de energía, así como la disposición final en rellenos sanitarios. El punto clave no es cuántas opciones de manejo 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 o regionales, así como a los principios básicos de las políticas ambientales en la materia" (2001, pág. 26).

Los métodos actuales de tratamiento de residuos incluyen rellenos sanitarios, compostaje, digestión anaerobia, incineración, pirolisis y gasificación. En la Figura 2-1 se muestra la fuerte interrelación entre los tratamientos de RS y cómo la selección de uno o más de ellos afectan la operación del otro.

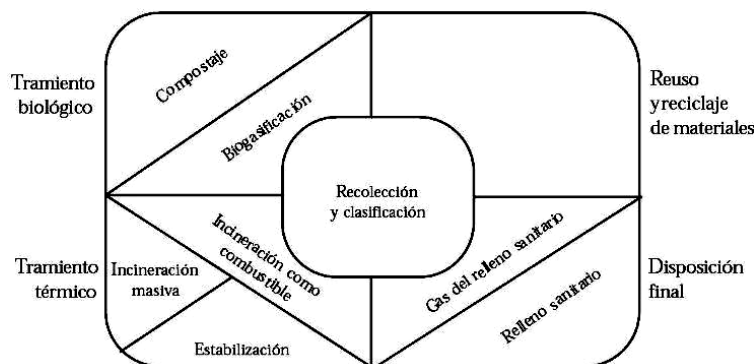


Figura 2-1. Tipos de tratamiento de residuos.

Fuente: INE (2001)

Belgiorno et al. (2003) indican que la combustión, la gasificación y la pirolisis son los procesos térmicos de conversión disponibles para el tratamiento térmico de residuos sólidos (Figura 2-2). Mediante estos procesos, se pueden recuperar diversos productos de los residuos, tales como químicos (bisulfito de sodio, dimetil éter), metanol, amonio y electricidad.

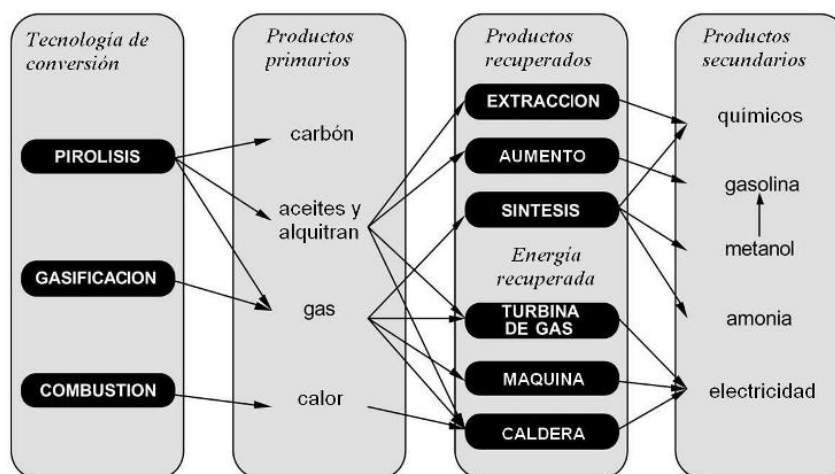


Figura 2-2. Procesos de conversión térmica y productos.

Fuente: Belgiorno et al. (2003)

2.2.1. Tratamiento por digestión anaerobia

Los residuos de la agricultura, mercado de hortalizas y de industrias de procesamiento de alimentos tienen un alto contenido orgánico y en los países en desarrollo estos son normalmente



eliminados en tiraderos o compostados. Estas formas de eliminación son antihigiénicas, resultando en mal olor y contaminación del agua debido a la filtración de líquido de los vertederos en las aguas subterráneas. Debido a la presencia de altos contenido de carbono en los desechos orgánicos de estas fuentes, el proceso de biometanización - digestión anaerobia (DA)- aparece como la opción más viable (Rajeshwari et al., 2001).

La DA es una técnica de fermentación que se emplea en algunas instalaciones para el tratamiento de aguas residuales o estiércol de ganado, pero el proceso también ocurre en los RESA. La DA funciona sin oxígeno libre y el biogás generado contiene principalmente metano y dióxido de carbono, pero con frecuencia transporta impurezas, tales como la humedad, H_2S , siloxano, y partículas de materia. El biogás puede ser utilizado como combustible para motores, turbinas de gas, pilas de combustible, calderas, calentadores industriales, otros procesos, y la fabricación de productos químicos (R. Williams, 2004).

La DA se produce en tres etapas: la hidrólisis/licuefacción, acidogénesis y metanogénesis (Figura 2-3). Un primer grupo de microorganismos segrega enzimas, que hidroliza materiales poliméricos a monómeros, como la glucosa y los aminoácidos. Estos son posteriormente convertidos por un segundo grupo -bacterias acidogénicas- a ácidos grasos más volátiles, H_2 y ácido acético. Por último, un tercer grupo de bacterias metanogénicas, convierten H_2 , CO_2 , y acetato a CH_4 (Verma, 2002).

Las bacterias implicadas en el proceso de producción de biogás son sensibles a ciertos factores. Por ello, en la operación de un digestor (equipo donde se realiza la DA) se debe tener en cuenta lo siguiente: temperatura y tipo de sustrato, sólidos totales (ST) en el sustrato, temperatura del digestor, el pH (medida de acidez o alcalinidad), el carbono/nitrógeno (C/N), tiempo de



retención, grado de mezclado, el agregado de inoculantes y la presencia de compuestos inhibidores del proceso (Hilbert, 2003; Laichena y Wafula, 1997).

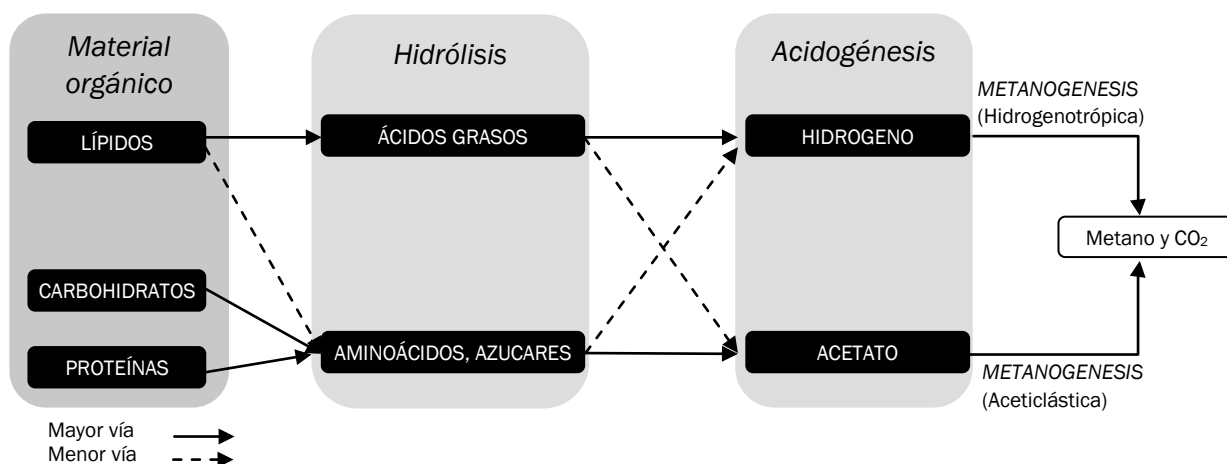


Figura 2-3. Proceso de digestión anaerobia.

Fuente: Williams, 2004.

Un digester produce un gas combustible y un buen acondicionador de suelos. A diferencia de compostaje, el proceso de DA conserva, incluso mejora el valor nutritivo de la materia prima original. Durante el proceso, los desechos crudos pueden ser digeridos y regresados al medio ambiente en forma de fertilizante y combustible, sin deteriorar el medio ambiente. Se ha demostrado que el uso de una mezcla de líquido compuesto de las plantas de biogás en la agricultura puede aumentar el rendimiento de arroz, maíz, trigo, el algodón y el 5,6%, 8,9%, 15,2% y 15,7%, respectivamente (Batoool y Chuadhry, 2008).

Tchobanoglous et al, (1994) exponen que el proceso de DA puede utilizarse para procesar una combinación de la fracción orgánica de los RSM y de fangos de plantas de tratamientos de aguas residuales. El contenido de humedad y los nutrientes requeridos para el proceso se añaden a los residuos que se van a procesar, en forma de fangos de aguas residuales o de estiércol de vaca (ver Figura 2-4).

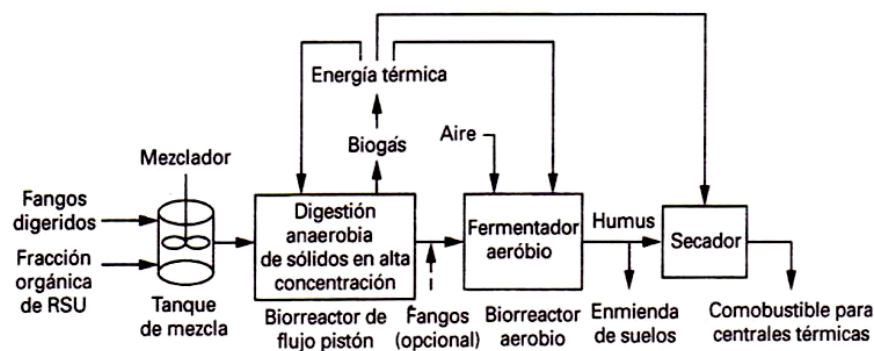


Figura 2-4. Digestión anaerobia de alta concentración con fangos y RSM.

Fuente: Tchobanoglous et, al, 1994

El tratamiento por DA con RSM implica tres pasos. El primer paso consiste en la preparación de la fracción orgánica de los RSM, esto es: recepción, selección, separación y reducción de tamaño. El segundo implica la adición de humedad y de nutrientes, la mezcla, el ajuste de pH hasta aproximadamente 6.8 y el calentamiento de la masa húmeda entre 55 y 60 °C. El tercero incluye la captura, almacenamiento y, si es necesario, la separación de los componentes gaseosos (Tchobanoglous et, al, 1994).

Independientemente del sistema usado, se deberá siempre tener cuidado que la alimentación se realice en el menor tiempo posible, puesto que en dicho intervalo disminuirá la producción de biogás, como consecuencia de una incipiente descomposición aeróbica; particularmente en el caso de los sistemas calefaccionados, donde las pérdidas de calor deben ser reducidas al máximo (Hilbert, 2003).

2.2.1.1. Tipos de digestores

Hilbert (2003) propone la clasificación mostrada en la Tabla 2-9 para diversos tipos de digestores de acuerdo al tipo de carga, características del material a ser digerido (sustrato) y manejo bioquímico.



Tabla 2-9. Clasificación de digestores

Criterio	Tipo de digestor
Carga	a) Sistema Batch b) Sistema continuo o semicontinuo
Intensidad de mezcla	a) Mezcla completa b) Mezcla parcial o nula
Manejo del substrato	a) Contacto anaeróbico b) U.A.S.B.: (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) c) Lecho fluidizado d) Filtro anaeróbico
Manejo bioquímico	a) Una etapa b) dos etapas

Fuente: (Hilbert, 2003).

Los procesos de DA pueden ser de alta o baja concentración. En la digestión de baja concentración, se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos iguales o menores del 4-8%. Una de las desventajas de este tipo de digestión, tal como se aplica a los RS, es que se requieren considerables cantidades de agua para que el contenido en sólidos llegue al rango requerido. En la DA de sólidos en alta concentración, el contenido de sólidos total es de aproximadamente 22% o más. Dos ventajas importantes de este proceso son: más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de gas por unidad de volumen del tamaño del digestor (Tchobanoglous et al., 1994).

2.2.1.2. Aplicaciones del digestor

La aplicación del digestor en el área rural ha sido muy importante, dentro de ella se pueden diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía. En este caso la tecnología desarrollada ha buscado lograr digestores de mínimo costo y mantenimiento fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía. El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo buscado es brindar energía y solucionar



graves problemas de contaminación. Los digestores de alta eficiencia desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento (Hilbert, 2003).

La aplicación a pequeña escala de la DA en las zonas rurales ha sido utilizado en países como China y la India. En Nepal, la aplicación de digestores de pequeña escala (4-10 m³) ha aumentado considerablemente en los últimos años. El biogás se utiliza principalmente para cocinar, aunque en el 25% de los hogares también se utiliza para la generación de electricidad (Ferrer et al., 2009).

Valdés (2009) reportó que un digestor que se construirá en la Lechera El Porvenir, localizada en Coahuila, México, tendrá una capacidad de tratamiento de 28,000 m³ de estiércol de vaca (unos 19,600 kg, considerando una densidad de 700 kg/m³ para el estiércol fresco apelmazado, indicada por Terrón, 2003) y capacidad de generación eléctrica de 300 kW, con lo que se generarán 30 empleos directos y 100 empleos indirectos. Beltrán (2009) reportó que la procesadora Charricos, en Tabasco, opera un digestor con capacidad para 23 toneladas de excremento y vísceras, de las cuales se esperan generar 16,000 litros de biogás. Esta planta genera 15 empleos directos y 19 indirectos.

La DA de la biomasa ha sido demostrada y aplicada comercialmente con éxito. Se ha empleado bajo diversas situaciones y variedades de materias primas como los residuos domésticos orgánicos, los desechos industriales orgánicos, estiércol y lodos (Faaij, 2006; Rajeshwari et al., 2001). De acuerdo al reporte de bioenergía de la Agencia Internacional de Energía (IEA Bioenergy, 2008), para el 2008 se tenían operando 245 plantas de biodigestión en el mundo (Tabla 2-10).



Tabla 2-10. Plantas anaeróbicas en varios países.

País	No. De plantas	País	No. De plantas	País	No. De plantas
Austria	27	Portugal	2	Martinica	1
USA	5	Polonia	3	Canadá	1
UK	3	Países Bajos	6	Bélgica	4
Suiza	15	Malta	1	Finlandia	4
Suecia	14	Korea	1	Estonia	1
Japón	9	Italia	12	Alemania	85
España	17	Corea	1	Dinamarca	22
Escocia	1	China	2	Jordania	1
Francia	7				

Fuente: IEA Bioenergy, Task 37, Plant list, 2008

Recientemente en México se anunció una partida económica para la instalación de digestores. \$USD 50 millones corresponden a un préstamo del Banco Mundial y \$USD 10.5 millones como donativo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente-GEF), esta cantidad se suma a los \$MXP 100 millones que aporta la SAGARPA en este 2010, en la aplicación de tecnologías e infraestructura en proyectos verdes (Valdés, 2010).

Davidsson et al. (2007) exponen que reemplazar RESA's o la incineración de residuos orgánicos con digestores anaeróbicos es una forma de incrementar la sustentabilidad. En particular, la disposición de residuos orgánicos en RESA's necesita ser reemplazada por otros tratamientos. La DA puede ser usada para tratar residuos biodegradables y a la vez producir energía en forma de gas metano y fertilizante en forma de residuo digerido.

Seoáñez y Bellas (2000) indican que en industrias de extracción de aceite de oliva la producción de metano se obtiene en una proporción de 25 L por litro de alpechín depurado, equivalentes a 6,000 Kcal/m³ de gas. Este valor de contenido energético en el biogás es consistente con lo expuesto por Hilbert (2003), quien señaló que el contenido de energía de 1 m³ de biogás (60% CH₄ y 40% CO₂) es aproximadamente 6 KWh/m³ (1 KWh=860 Kcal). Polprasert



(2007) indica que 1 m^3 de biogás ($4,500\text{-}6,300 \text{ kcal/m}^3$), es equivalente a 0.4 kg de diesel, 0.6 kg de petróleo o 0.8 kg de carbón.

No obstante que el poder calorífico del biogás generado en plantas de biodigestión es inferior al reportado por Henry y Heinke (1999) para el biogás de un relleno sanitario ($37,000 \text{ KJ/m}^3$ ó $8,843 \text{ Kcal/m}^3$), recientes progresos en equipos de cogeneración han permitido una más eficiente utilización del gas generado y los continuos avances en las técnicas de fermentación aseguran un sostenido desarrollo en este campo.

2.2.1.3. Consideraciones en la construcción de digestores

El medio ambiente con sus características climáticas y de suelo, condicionan el tipo de digestor a construir e inciden en el monto de la inversión inicial necesaria. Esto porque existen parámetros que pueden ser modificados como la temperatura de funcionamiento, el tiempo de retención hidráulica y la velocidad de carga volumétrica los cuales están relacionados entre sí y determinan la eficiencia final del digestor y la energía neta disponible (Hilbert, 2003).

La selección de los materiales de construcción tiene una gran importancia y por lo tanto deben satisfacer los siguientes requerimientos: (a) resistencia a los esfuerzos de origen mecánico y térmico; (b) resistencia al ataque químico; (c) posibilidad de ser moldeado y/o construido localmente; (d) disponibilidad local; y (e) compatibilidad ambiental.

El dimensionamiento y diseño de la cámara de descarga dependerá fundamentalmente del uso que se le dará al efluente y que como mínimo deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al de descarga diario. No importa cuál sea el sistema a utilizar, la cámara de digestión deberá cumplir los siguientes requisitos (Hilbert, 2003):



- Impermeable al agua y al gas para evitar las pérdidas del líquido en digestión, con el consecuente peligro de contaminación; y la pérdida de gas que disminuirá la eficiencia y provocaría el riesgo de explosiones en las cercanías del digestor.
- Aislante, las pérdidas de calor deben ser evitadas al máximo, puesto que el mantenimiento de la temperatura de digestión es logrado con el aporte de calor externo y por lo tanto todo ahorro en este sentido redundará en una mayor cantidad de energía neta disponible. Este aspecto es particularmente importante para los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas.
- Mínima relación superficie/volumen, a fin de ahorrar material y mano de obra, como así también reducir la superficie de intercambio de calor.
- Estabilidad estructural, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas; incluyendo un cuidadoso estudio del suelo, especialmente en los que serán construidos bajo tierra, donde se pueda afectar alguna capa freática.

Debido a que la producción de gas de un digestor anaeróbico es continua a lo largo de las 24 horas del día, será necesario almacenar el gas producido durante las horas en que no se consume. Por lo general se almacena no menos del 50% de la producción diaria (Hilbert, 2003; Guevara, 1996).

Mantilla et al. (2007) indican que cuando el gas producido se utiliza sólo como combustible para motores, se recomienda no limpiarlo, dado que la presencia de agua y ácido sulfhídrico no afectan el rendimiento ni los componentes del motor. Sin embargo, debido a que otros componentes de la planta pueden verse afectados con la mezcla de estos elementos (que pueden formar ácido sulfúrico), la mejor solución es remover el agua del biogás.



2.2.1.4. Transporte de sustrato

Los requerimientos para el manejo y transporte del sustrato varían de acuerdo a la naturaleza del mismo y a la clase del proceso utilizado. Por ello, en el caso de los residuos sólidos urbanos, la selección y/o diseño del equipo de transporte y almacenamiento deben de considerar las características de los residuos a recolectar y proporción de lixiviados para evitar la contaminación del suelo y riesgos a la salud de los trabajadores y residentes de las zonas aledañas a la planta. En la Tabla 2-11 se exponen algunas consideraciones importantes para la digestión anaeróbica de alto contenido de sólidos de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales, propuestas por Tchobanoglous et al. (1994).

Tabla 2-11. Consideraciones de diseño

Detalle	Comentario
Tamaño del material	Los residuos a ser digeridos deben ser triturados a un tamaño que no interfiera con el funcionamiento eficiente del mecanismo de carga y descarga.
Equipo de mezclado	El equipo de mezclado dependerá del tipo de reactor a ser usado.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados con lodos	Depende de las características de los lodos.
Tiempo de retención de la masa	Uso de 20 a 30 días para diseño, o base de diseño sobre resultados de estudios de plantas piloto.
Tasa de carga basada en los sólidos volátiles biodegradables (BVS)	0.375 a 0.4 lb/pie ³ *día (6 a 7 kg/m ³ *día). No está bien definido en la actualidad. Tasas significativamente más altas se han reportado.
Concentración de sólidos	Entre 20 y 35% (22 a 28% típico).
Temperatura	Entre 85 y 100 °F (30-38 °C) para mesofílicos y entre 131 y 140 °F (55 y 60 °C) para reactores termofílicos.
Destrucción de BVS	Varía de unos 90 a 98% dependiendo del tiempo de retención de la masa y la tasa de carga de BVS.
Sólidos totales destruidos	Varía dependiendo del contenido de lignina en la materia prima.
Producción de gas	10 a 16 pie ³ /lb de sólidos volátiles biodegradables destruidos (0.625 a 1.0 m ³ /kg), (CH ₄ =50%; CO ₂ =50%).

Fuente: Tchobanoglous et al., (1994)

2.2.1.5. Estimación de la generación de biogás

Con base en lo señalado por Tchobanoglous et al., (1994), se presenta un ejemplo donde se estima la cantidad de metano que puede ser recuperada de la fracción orgánica de una tonelada de residuos (masa bruta, M_B). Se asumen los siguientes parámetros.

- Contenido de humedad= 20%.



- Sólidos volátiles, $SV = 0.93 \times ST$ (sólidos totales).
- Sólidos volátiles biodegradables, $BVS = 0.70 \times SV$.
- Eficiencia de conversión esperada de BVS, $\eta_c = 95\%$.
- Producción de gas, $P_G = 0.5 \text{ m}^3/\text{kg BVS destruidos}$.
- Contenido de energía del biogás, $E = 5.18 \text{ kW/m}^3$.
- Valor de $1 \text{ kW} = 0.685 \text{ MXP}$
- Se determina la masa de los sólidos volátiles en una tonelada de residuos orgánicos.

$$M_{VS} = (M_B) \times (H_{\%}) \times (0.93) = (1000 \text{ kg})(0.80)(0.93) = 744 \text{ kg}$$

- Se determina la masa de los sólidos volátiles biodegradables destruidos.

$$M_{BVS} = (M_{VS}) \times (\eta_c) \times (0.95) = (744 \text{ kg})(0.70)(0.95) = 494.76 \text{ kg}$$

- Se determina el volumen total de gas generado, V_{GG} .

$$V_{GG} = (M_{BVS}) \times (T_G) = (494.76 \text{ kg})(0.5 \text{ m}^3/\text{kg}) = 247.38 \text{ m}^3$$

- Se determina el contenido de energía en el gas, C_E .

$$C_E = (V_{GG}) \times (E) = (247.38 \text{ m}^3)(5.18 \text{ kW/m}^3) = 1,281.43 \text{ kW}$$

- Se determina el valor total del gas producido, V_{GP} .

$$V_{GP} = (C_E) \times (\$_{kW}) = (1,281.43 \text{ kW})(0.685 \text{ MXP/kW}) = 877.78 \text{ MXP}$$

2.2.1.6. Evaluación económica

La tecnología del biogás presenta características propias que hacen más complejo su análisis pues no sólo interviene el aspecto energético sino que también existe un importante impacto de difícil evaluación en sanidad, fertilización, mejoramiento de suelos, alimentación de animales y mejoramiento de las condiciones de vida. Esto se debe fundamentalmente a que además de la producción de gas combustible el sustrato utilizado sufre una transformación a través del proceso fermentativo anaeróbico (Hilbert, 2003).



Es difícil hacer una evaluación económica generalizada sobre digestores, debido a que influyen aspectos como el tipo, tamaño, sustrato empleado, sistemas auxiliares para compensar el clima, utilización del biogás generado, eficiencias del sistema, costos de capital, y disponibilidad de recursos técnicos, entre otros. Esta situación puede verse en la Tabla 2-13, donde se exponen algunos proyectos de DA y sus características respecto al tipo de sustrato y costos de fabricación. La SAGARPA-FIRCO (2007) indican que de acuerdo con información de algunos proveedores, los costos del sistema de biodigestión, en general, sin incluir el motogenerador, se ubican en los niveles que se aprecian en la Tabla 2-12.

Valdés (2010) señala que en México se tiene previsto instalar 300 digestores en todo el país, con un costo de \$MXP 2 millones por unidad. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se indican los costos de mantenimiento ni los beneficios económicos que se obtendrán con la instalación. Castro (2009) indicó que en Yucatán en el 2009 se instalaron 18 digestores, con un monto por proyecto de \$MXP 3 millones. La Corporación para el Desarrollo Agropecuario de Nuevo León publicó un boletín en septiembre de 2006, donde informó que en la Granja "El Chanco", localizada en Cadereyta, Nuevo León, se inauguró el proyecto de digestores para la generación del biogás y su transformación en energía eléctrica. La inversión ascendió a \$MXP 740 mil y tiene una generación de biogás de 650 m³/día, con una capacidad de generación eléctrica de 60 kWel.

Tabla 2-12. Costos de un sistema de biodigestión.

Concepto	Porcentaje del costo total
Ingeniería y diseño	9.31%
Fosa de mezclado	4.66%
Digestor	62.12%
Sistema de Manejo de Gases	6.21%
Quemador	9.31%
Laguna secundaria	7.76%
Filtro	0.62%
Total	100.00%

Fuente: SAGARPA-FIRCO (2007)



Tabla 2-13. Proyectos de biodigestión

Referencia	Tipo de planta	Capacidad de la planta	Costo	Alimentación	Observaciones
(Ferrer et al., 2009) Lima, Perú	Experimental	199.5 L	~200 €	Estiércol de cerdo	• Sistema Batch, operación a temperatura ambiente. • Tasas de producción de 5,4 L de biogás/día, rendimiento de 66.1 L de biogás kg/VS y contenido de metano en el biogás notablemente bajo (~20%), incluso después de 80 días, lo que indica que un periodo de adaptación más largo, de al menos 3 meses, es necesario para garantizar el desarrollo inicial de la población metanogénica a temperatura ambiente.
National Biogas and Manure Management Programme India	Comercial	100 kg-día-1	~225 €	Estiércol de vaca	• (sin observaciones)
(Mantilla et al., 2007) Colombia	Comercial	65 ton-día-1	1.634.016 €	Estiércol de vaca	• Sistema continuo. • Producción de 2.440 m³ de biogás, con capacidad de generación eléctrica de 500 kW. • Los costos anuales de operación estimado son: funcionamiento de equipos de la planta, 6.247 €; mano de obra, 25.883 €; mantenimiento y repuestos, 5% de la inversión inicial; cargas de capital, 10% de la inversión inicial; consumo de combustible, 354.867 €
(Braun and Wellinger, 2003)	Comercial	----	5.493.300 €	Estiércol de cerdo/aguas industriales	• Producción de 6.600 m³ de biogás, con capacidad de 23.203.000. kWh/a. • Costo total de operación: 452.132 €/a, de los cuales 164.666 son de mano de obra, 124.000 de mantenimiento y 163.466 de diversos. • Ingresos totales por 1.051.200 €/a de los cuales 905.200 son ingresos por venta de energía (8-8.7 ¢€/kWh) y 146.000 ingresos por sustratos.
(Braun and Wellinger, 2003)	Comercial	-----	250.000 €	Maíz para silaje/abono	• Producción de 700 m³ de biogás, con capacidad de 750.000. kWh/a. • Costo total de operación: 58.200 €/a, de los cuales 9.000 son de mano de obra, 750 de mantenimiento y 48.450 de diversos. • Ingresos totales por 78.225 €/a por venta de energía (10.23 ¢€/kWh).

2.2.2. Tratamiento por gasificación

Tchobanoglous et al. (1994) definen a la gasificación como el proceso de combustión parcial en el que un combustible (material sólido) es quemado a propósito con menos aire que el estequiométrico. Esencialmente el proceso implica la combustión parcial (oxidación) de un combustible carbonoso para generar un gas combustible con altos contenidos de CO, H₂, metano (CH₄), hidrocarburos ligeros, CO₂ y N₂ en función del proceso utilizado (Williams, 2004; Belgiorno et al., 2003).

Algunos investigadores (Digman et al., 2009; Ravindranath et al., 2004) exponen que cuando un gasificador está funcionando a presión atmosférica con aire como oxidante, los productos finales del proceso de gasificación son un gas de bajo poder calorífico que normalmente contiene en volumen un 10% de CO₂, 20% de CO, 15% de H₂ y un 2% de CH₄ en el balance, siendo el resto de N₂; un coque que contiene carbono y los inertes originalmente en el combustible; y líquidos condensables parecidos al aceite pirolítico. La pirolisis es un proceso de gasificación indirecto con gases inertes como agente gasificador (ver Figura 2-5).

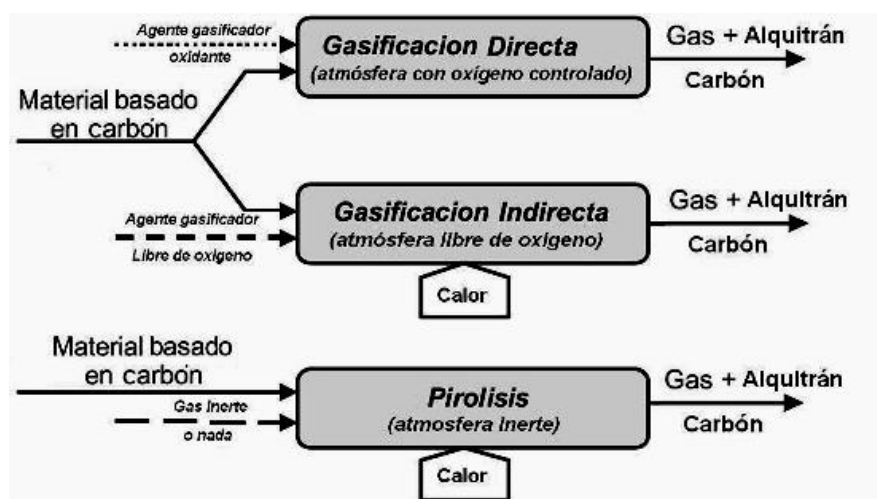


Figura 2-5. Procesos de gasificación y pirolisis.

Fuente: Belgiorno et al (2003)



Debido al efecto diluyente del nitrógeno en el aire de entrada al gasificador, el gas tiene un contenido energético bajo de aproximadamente $5,600 \text{ kJ/m}^3$. Revuelta (2003) expone que el gas de síntesis (syngas), cuando se emplea aire como agente oxidante, posee un poder calórico del orden de 4 a 7 MJ/m^3 ; en cambio, si se emplea como agente oxidante el O_2 se pueden alcanzar de 10 a 18 MJ/m^3 . Sin embargo, por razones económicas y tecnológicas, la tecnología más empleada es la que utiliza aire como agente oxidante.

Las tecnologías de gasificación de biomasa convencionales se basan en la reacción entre la biomasa (fuente de carbono) y cantidades limitadas de oxígeno y vapor. El hidrógeno y gas de síntesis a partir de biomasa celulósica de gasificación son combustibles gaseosos ecológicamente limpios utilizados para la generación de energía. Por otra parte, los combustibles líquidos derivados del gas de síntesis como el metanol, dimetil éter y diesel sintético, también son combustibles limpios (Digman et al., 2009). Los gases combustibles se pueden utilizar en motores de combustión interna y externa, celdas de combustible y otros (Williams, 2004; Ravindranath et al., 2004; Larson, 1998; Tchobanoglous et al., 1994).

Los combustibles de biomasa disponibles para la gasificación incluyen el carbón de leña, madera y residuos de madera, así como una multitud de residuos agrícolas, tales como mazorcas de maíz, cáscaras y cortezas de coco, paja de cereales, cáscara de arroz, etc. (FAO, 1986). Revuelta (2003) expone que entre las posibles fuentes de biomasa se encuentran los residuos agrícolas; los cultivos energéticos, como la caña energética y los bosques de eucalipto; los desechos de la industria maderera, como el aserrín; el bagazo de caña; los desechos urbanos, como cajas de embalaje, cartón, muebles rotos y papel, y los residuos de madera de la construcción.



Algunos autores (Revuelta, 2003; Stassen, 1995) indican que la gasificación de la biomasa afecta menos al cambio climático y la contaminación. Mientras que el CO₂ liberado a la atmósfera por la combustión de la biomasa forma parte del ciclo natural del carbono (pues anteriormente había sido fijado por las plantas), el CO₂ producido durante la quema de combustibles fósiles (como el carbón, el petróleo, la turba y el gas natural) fue fijado durante millones de años y retirado de la atmósfera por la acción de las plantas y hoy es liberado nuevamente. Además, el empleo de biomasa tiene como ventaja su bajo contenido de azufre, por lo que no favorece las lluvias ácidas. Stassen (1995) indica que las emisiones de gases de la gasificación de biomasa no son un factor significativo, excepto posiblemente en las inmediaciones de la planta, donde las fugas de CO puede ser peligrosas para los trabajadores.

2.2.2.1. Tipos de gasificadores

Larson (1998) clasifica a los gasificadores de biomasa de la siguiente forma: flujo ascendente con cama fija, flujo descendente con cama fija, lecho fluidizado burbujeante, lecho fluidizado circulante y fluido en camas calentado indirectamente. Sus escalas de aplicación de acuerdo a la capacidad combustible se presentan en la Figura 2-6.

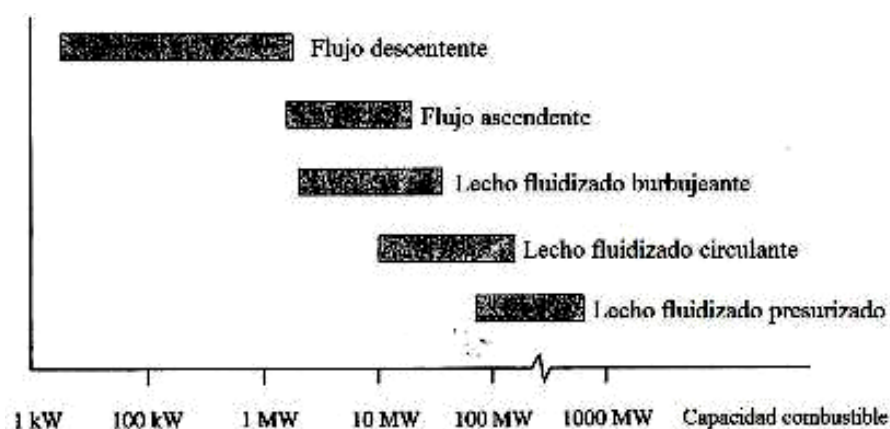


Figura 2-6. Escalas de aplicación para gasificadores de biomasa.

Fuente: Larson, 1998



En la gasificación de flujo ascendente, el aire fluye hacia arriba desde la base de los reactores, con los residuos fluyendo hacia abajo en contra de la corriente de aire. La gasificación se lleva a cabo lentamente en un movimiento fijo de la cama. Debido a la humedad, el alquitrán y los gases generados no pasan a través de una cama caliente de carbón y se producen menos rompimientos térmicos de los hidrocarburos pesados y alquitranes, por lo que el gas producido es relativamente alto en alquitrán. Los alquitranes pueden ser condensados y reciclados para aumentar la ruptura térmica de los alquitranes (Williams, 2004).

En la gasificación de flujo descendente, el aire y el flujo de residuos bajan simultáneamente en el reactor, por lo que se produce un mayor nivel de rupturas térmicas de los alquitranes pesados y los hidrocarburos que se extraen a través de la oxidación a alta temperatura. Esto aumenta las concentraciones de hidrógeno e hidrocarburos ligeros y produce un gas con bajo contenido de alquitranes. El aire/vapor introducido justo por encima de una "garganta" o sección estrecha en el reactor, influye en el grado de ruptura del alquitrán (Williams, 2004). Zanzi y Sorla (2006) asientan que una limitación física de la relación entre el diámetro y tamaño de partícula hace que la capacidad máxima de esta configuración sea de 500 kg/h o 500 kWe (kilo-watt eléctrico).

En un gasificador de lecho fluidizado se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a la velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Se comienza por calentar externamente el lecho, cuando se alcanza una temperatura suficientemente elevada, las partículas del combustible se introducen en el lecho del reactor, se mezclan rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente, alcanzando así la temperatura de éste. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos, la fase de gas se reproduce una nueva gasificación y reacciones de los alquitranes. La



instalación va equipada con un ciclón interno, a fin de reducir el mínimo de escape de partículas sólidas por soplado. Las partículas de ceniza se extraen también por la parte inferior del reactor y en el ciclón, debiendo extraerse de la corriente de gas si éste se emplea en aplicaciones para motores (García et al., 2005).

Los sistemas de gasificación se llaman gasificadores poder cuando los gases producidos en el gasificador se emplean como combustible para motores de combustión interna y producir potencia en el eje para la generación de energía eléctrica, bombeo de agua, molienda de granos, aserrar la madera u otros. Por otra parte, si el gas se utiliza para alimentar quemadores externos o producir calor en calentadores, secadoras, u hornos, los sistemas de gasificación se conocen como los gasificadores de calor (Stassen, 1995).

Los métodos para describir la fuerza de salida de los gasificadores de poder y de calor varían. La salida de un gasificador de poder es usualmente fijada en términos de la potencia eléctrica máxima (kWe) que este puede producir cuando es conectado a un grupo motor-generator. En contraste, la salida de un gasificador de calor es usualmente fijada como el valor térmico (kWth) del gas producido a máxima salida (Stassen, 1995).

Stassen and Knoef (2001) indican que los gasificadores de flujo descendente se utilizan en una gama de potencias desde 80 hasta 500 kWe. Entre los inconvenientes de este tipo de gasificador están:

- El contenido de humedad de la biomasa debe ser inferior al 25%;
- La incapacidad para funcionar con una serie de combustibles no elaborados. A menudo es necesario la peletización o fabricación de briquetas con la biomasa;
- La salida del gas tiene una temperatura que provoca una menor eficiencia de gasificación;



- Las altas cantidades de ceniza y partículas de polvo presente en el gas por metro cúbico generalmente aumenta con la carga de generador de gas, por la sencilla razón de que el aumento de las cargas da lugar a velocidades de gas más altas.

2.2.2.2. Aplicaciones

La gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar energía. A principios del siglo XX, cualquier tipo de rechazo celulósico, como pepitas de aceitunas, paja y cáscaras de nueces, podían ser gasificadas (Tchobanoglous et al., 1994). Durante la segunda guerra mundial, los gasificadores de biomasa fueron ampliamente usados en Europa para producir gas a partir de leña y madera e impulsar tractores, motores de ferrocarril, barcos de pesca, aserraderos, estaciones de bombeo y otras máquinas industriales (Gabra, 1996). Sin embargo, el desarrollo de suministros de petróleo más baratos después de la guerra condujo al abandono total de los gasificadores hasta la crisis del petróleo en los setentas (Larson, 1998; Tchobanoglous et al., 1994).

El Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos (ISR, 2006) indica que en la actualidad existe un gran número de procesos de gasificación, aunque la mayor parte de ellos sólo se han desarrollado a nivel de plantas de demostración o plantas piloto; además, muchos procesos están dedicados casi exclusivamente a biomasa vegetal, que puede ser un campo de aplicación adecuado, pero completamente diferente de la gasificación de residuos urbanos y sus fracciones. Purohit (2009) enuncia que los proyectos de gasificación de biomasa pueden ser interesantes bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) porque desplazan directamente las emisiones de gases de efecto de invernadero mientras contribuyen al desarrollo rural sustentable.

Debido a que tienen diferentes productos finales, los gasificadores de poder y de calor son dirigidos a mercados muy diferentes. Además, en muchos aspectos técnicos, económicos y



operativos son tecnologías muy diferentes. Una de las diferencias técnicas principales es que los gasificadores de energía debe producir un gas muy limpio debido a las estrictas demandas de calidad del combustible de un motor de combustión interna. Así, el gas resultante debe ser primero filtrado, enfriado, y mezclado en un sistema elaborado para el acondicionamiento del gas, el cual es una parte integral de un gasificador de poder. Por el contrario, los gasificadores de calor no requieren de sistemas complicados de depuración de gases porque el gas quemado en calderas externas requiere poco o nada de acondicionamiento de gases. Por ello, los gasificadores de calor son más fáciles de diseñar y operar y son menos costosos en comparación con los gasificadores poder (Stassen, 1995).

2.2.2.3. Operación

Los gasificadores de biomasa pueden ser operados desde 1 hasta 24 h al día y funcionar los 365 días del año, si es necesario. Pueden ser instalados y utilizados en cualquier pueblo donde la biomasa está disponible o puede cultivarse, excepto probablemente en las zonas desérticas. Esta flexibilidad no existe para otras energías renovables como la eólica, la solar y sistemas micro-hidráulicos (Ravindranath et al., 2004).

A pesar de que existen numerosas plantas de gasificación de biomasa, es difícil encontrar datos reales y contrastables de eficiencias energéticas, tanto para los procesos de gasificación como para los de otras tecnologías, porque esta información tiene un valor comercial. Sin embargo, se estima que las eficiencias de transformación de los residuos en energía son inferiores en una planta de gasificación que en las de combustión total. Estas pérdidas pueden suponer de un 25-30% del poder calorífico total (PCI) de los residuos, de forma que la energía neta del gas antes de la compresión para entrada en el motor o turbina será del 70-75% de la energía primaria de los residuos. Si el rendimiento global del motor-generador es del orden del 35% respecto al PCI del gas, la generación total estará en torno al 26-27% del PCI de los residuos. A este valor se le



descuenta el autoconsumo de la instalación, lo que reducirá la exportación neta de energía hasta valores del 22% del PCI de los residuos alimentados (ISR, 2006). El aprovechamiento energético en los gasificadores se ve afectado por:

- Utilización del gas pobre (motores térmicos, turbinas de gas u otros).
- La calidad del gas se variable, ya que depende del tipo de residuo.
- El tipo de gasificador empleado.
- Pérdidas energéticas por falta de aprovechamiento del calor sensible del gas crudo.

Pérez et al. (2006) indican que las investigaciones sobre la tecnología de las instalaciones gasificador/motor han servido para conseguir diseños modernos que funcionan con seguridad y un nivel de capacidad técnica apropiado para aplicaciones rurales en países en desarrollo. Tales sistemas son económicos en ciertas condiciones, pero la tecnología y los medios de fabricación no están generalmente disponibles en muchos países en desarrollo y su utilización comercial es limitada. De los aspectos que deben cuidarse en la aplicación de gasificadores se encuentran:

- Cantidad de humedad en los residuos a gasificar. Esta puede influir en el precio del gas pero no afecta mucho el precio de la electricidad.
- El consumo de residuos considerando los valores de energía deseados.
- El valor en RPM del sistema para evitar caídas bruscas en la eficiencia.
- A mayor valor del radio de compresión, mayor eficiencia del sistema.

Sobre el radio de compresión, la FAO (1986) señaló que la eficiencia con la que un motor puede convertir la energía térmica en el combustible en energía mecánica (eje) de potencia, depende en primer lugar en la relación de compresión del motor. En la Figura 2-7 se muestra la relación entre la relación de compresión y el rendimiento térmico de un motor.

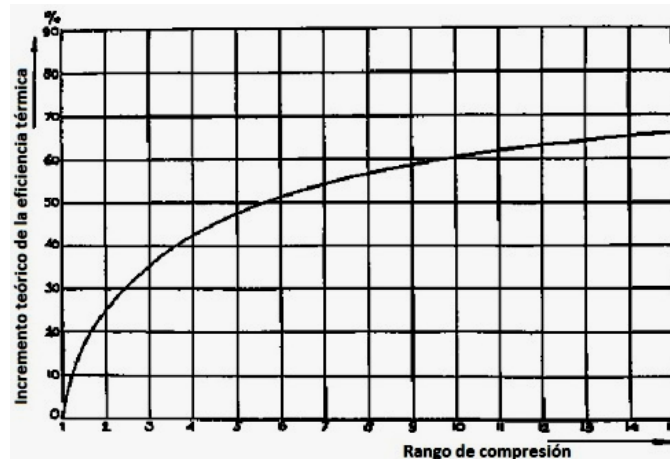


Figura 2-7. Eficiencia vs Compresión.

Fuente: FAO (1986)

Morris (1999) expresa que las comunidades rurales se caracterizan a menudo por su lenta tasa de crecimiento económico y elevado desempleo. Las instalaciones eléctricas de gasificación de biomasa significan puestos de trabajo con buenos salarios comparativos, con una generación de empleos total igual a 4,9 puestos de trabajo de tiempo completo por cada megavatio de capacidad de generación neta de la planta. Esta cantidad es similar a la indicada por DaoPower (2010), que señaló una creación de hasta 50 empleos para una planta de 15 MW.

2.2.2.4. Operación con RSM

No todos los residuos son buenos candidatos para la gasificación; es fundamental que los residuos tengan una cantidad importante de carbono gasificable. La adición de carbón o de algún residuo rico en carbono puede aumentar considerablemente la tasa de gasificación y la producción de CO, aumentando el rendimiento en la transformación (ver Tabla 2-14). El ISR (2006) indica que un residuo con PCI superior a 12-15 MJ/kg puede ser aceptable, aunque para valores más bajos la rentabilidad económica global de la instalación puede ser muy baja.



Tabla 2-14. Calidad del gas crudo a partir de mezclas de residuos

Tipo de residuo	80% Carbón 10% Biomasa 10% Plástico	60% Carbón 40% Biomasa 0% Plástico	60% Carbón 0% Biomasa 40% Plástico	60% Carbón 20% Biomasa 20% Plástico
Composición de gas (%V/V)				
H ₂	15.50	12.50	11.50	14.50
CO	13.00	19.00	12.50	13.00
CO ₂	19.00	16.00	14.50	14.00
CH ₄	2.5	3.75	2.50	2.00
Producción de gas (Nm ³ /kg)	3.5	3.00	3.10	3.20
PCI gas crudo (MJ/Nm ³)	4.70	7.50	8.40	6.00
Energía gas (MJ/kg res)	16.0	20.5	22.5	17.5

Fuente: ISR Instituto para la sostenibilidad de los Recursos (2006)

En general, los RSM destinados a gasificación deben recibir tratamiento previo a su utilización para remover humedad, materiales inertes, metales y otros residuos que su incineración provoque gases tóxicos. Un tamaño de partícula reducido favorece los mecanismos de transferencia de calor y reduce la cantidad de carbono residual en las escorias. Los tamaños dependen de las tecnologías, pero varían entre 80 y 300 mm (ISR, 2006).

Un error común es suponer que cualquier tipo de biomasa que se inscribe dentro de la abertura de la tapa de recarga puede ser utilizado como combustible. Algunas empresas comerciales con poca experiencia práctica, pero tratando de sacar provecho del renovado interés en la gasificación, han anunciado la posibilidad de utilizar casi cualquier tipo de biomasa, incluso en los gasificadores que funcionan bien sólo con combustibles que cumplen normas muy estrictas. Esto ha creado expectativas poco realistas y decepciones con la tecnología (FAO, 1986).

2.2.2.5. Aspectos económicos

Ravindranath et al. (2004) exponen que un sistema de energía con biomasa funcionó por más de 14 años (1988-2004) en la aldea de Hosahalli (con una población de 218 en 2003), cumpliendo todas las necesidades eléctricas de la aldea. El suministro de iluminación y agua potable por tubería utilizando la electricidad de la biomasa, se proporcionó más del 85% de los



días durante los últimos seis años. El sistema consistía en un gasificador-motor-generator de 20 kW con todos los accesorios para el procesamiento de combustible y distribución de electricidad. El combustible, operación y mantenimiento osciló en 0.13 \$USD/kWh a una carga de 5 kW y en 0.07 \$USD/kWh a una carga de 20 kW (Tabla 2-15).

Tabla 2-15. Generación de electricidad y consumo de combustibles en gasificador de 20 kW

Descripción	2003	2002	2001	2000	1999	1998
Electricidad generada kWh/año en el modo de doble combustible	18651	17185	12775	7238	9617	9300
Electricidad generada kWh/año en el modo diesel-solamente	3326	3992	3476	5251	3267	2723
Electricidad total generada kWh/año	21977	21557	16251	12489	12884	12023
Tasa de consumo promedio de madera kg/kWh en el modo de doble combustible	1.8	1.64	2.07	1.28	1.27	1.32
Diesel usado en modo de doble combustible l/kWh	0.063	0.077	0.086	0.109	0.173	0.182
Diesel usado en modo se solo diesel l/kWh	0.567	0.76	0.779	0.564	0.379	0.432
Substitución de Diesel en porciento bajo modo de doble combustible	85.55	87.02	80.69	80.67	54.35	58.33

Fuente: Ravindranath et al. (2004)

La Tabla 2-16, expuesta por Stassen (1995), presenta los costos de inversión para las instalaciones de gasificación supervisados por el BGMP (Biomass Gasifier Monitoring Programme). Debido a las diferencias en costos, se hace una distinción entre las centrales eléctricas de gasificación realizados en países desarrollados (sistemas importados), plantas realizadas en los países en desarrollo (sistemas locales), y gasificadores de calor. Aunque en la práctica las plantas se pagan en muchas divisas diferentes, todos los gastos han sido convertidos a \$USD para efecto de comparación. En las plantas donde se presentó falta de rentabilidad las causas más importantes de la fueron: el alto costo del combustible de biomasa (especialmente carbón), alto costo de capital, bajo nivel de ahorro de combustible diesel, y el bajo número de horas de funcionamiento.



Tabla 2-16. Costos y rentabilidad de gasificadores supervisados por el BMGP

Sitio	Inversión total en \$USD (1990)	Inversión específica		Costos operacionales (\$USD/kWh)	Rentabilidad
		\$USD/kW _{el} a	\$USD/kW _{el} b		
Gasificadores de poder importados					
Sebubuk	60,000	2,000	2,300	0.07	nulo
Onesua	100,000	3,600	4,200	0.09	nulo
Mahe	30,000	850	850	0.25	marginal
Dogofiri	415,000	2,600	2,600	0.23	marginal
Tora	(15,000)c	(425) c	(650) c	0.12	nulo
Gasificadores de poder locales					
Balong	23,000	1,150	1,550	0.08	marginal
Majalengka	10,000	650	650	0.06	marginal
Lembang	6,500	650	500	0.12	nulo
Bago	12,000	425	1,400	0.04	nulo
Bolo	12,000	300	750	0.03	nulo
Itamarandiba	8,000	200	400	0.11	nulo
Gasificadores de calor					
Rajamandala	40,000	66 d	65d	41.6e	marginal
Espara Feliz	30,000	25 d	30 d	3.27 e	rentable
Santa Luzia	310,000	75 d	90 d		nulo

Nota: kWh = kilowatt-hora; kW_{el} = kilowatt eléctrico.

a Costo de inversión específicos del fabricante basados en la potencia de salida máxima.

b Costo de inversión específicos basados en BGMP medido sobre la potencia de salida máxima.

c Gasificador trabajando no apropiadamente.

d Como kW térmico.

e En \$USD/ton de combustible de biomasa.

Los gasificadores de media escala (30 -500 kW) utilizan equipos de lecho fijo alimentado por madera, carbón vegetal y algunos tipos de residuos agrícolas (mazorcas de maíz, cáscaras de coco). Los costos están en el rango de 300-800 \$USD/kW (sólo gasificador) dependiendo del tipo y capacidad, nivel de automatización y equipos auxiliares. La fabricación completa local es posible en los países que poseen una industria metalúrgica de fabricación bien desarrolladas (FAO, 1986). Los precios de gasificadores, de acuerdo a su capacidad y al fabricante norteamericano Stak Properties, se muestran en la Tabla 2-17.

Tabla 2-17. Precios de gasificadores de flujo descendente

Modelo	STAK-10K	STAK-50K	STAK-100K
Salida de Gas (m ³ /h)	5-10	50-80	100-120
Poder calorífico del Gas (KJ/m ³)	4600-5200		
Eficiencia de Gasificación	>70%		
Material requerido (Lb/h)	10-22	55-90	110-135
Precio \$USD	\$2,450	\$15,450	\$17,650

Fuente: http://www.stakproperties.com/index.php?p=3_23



2.2.2.6. Otras consideraciones

La selección del motor se tiene que considerar con mucho cuidado. Cuando se utiliza un motor diesel, se necesita una mezcla de 10% de diesel y 90% de gas pobre para evitar la aparición de detonaciones en el motor. Los motores que trabajan con gasolina son mucho más fáciles de transformarse al uso de gas pobre porque su conducta química es más semejante (Pérez et al., 2006).

El gas con calidad de máquina necesita un valor calorífico suficientemente alto (por encima de 4.200 KJ/m³), debe ser virtualmente libre de alquitrán y polvo para minimizar el desgaste del motor, y debería ser tan frío como sea posible para maximizar el consumo de gas del motor y la fuerza de salida (FAO, 1986). Stassen y Knoef (2001) expresan que en los últimos quince años, muchos pequeños sistemas de gasificación de escala han sufrido de problemas técnicos como:

- Desgaste extremo en motores debido a la fuerte contaminación de alquitrán en el gas;
- Operación poco fiable e inestable debido a las condiciones escoria en el reactor;
- Composición indefinida del gas y funcionamiento poco fiable debido a las variaciones en la caída de presión en el reactor.

Los gasificadores de biomasa pueden producir condensados que contengan alquitrán/fenol. Las cantidades producidas dependen de los combustibles y tipo de reactor. No todos los compuestos son biodegradables. Sin la adición de servicios eficaces de tratamiento de efluentes, el funcionamiento de estas plantas da lugar a un problema de contaminación ambiental.

La combustión del gas crudo, sin depurar, transforma el proceso de gasificación en una incineración en dos etapas, especialmente si la combustión se produce dentro de la misma instalación de gasificación, en equipos contiguos. Aún cuando el proceso completo pueda tener



justificaciones técnicas para algunos tipos de residuos y algunas ventajas administrativas, su estudio debería ser considerado dentro de los procesos de incineración (ISR, 2006).

2.2.3. Tratamiento por plasma

La incineración con recuperación de la energía es una técnica de tratamiento térmico usada en naciones industrializadas. No obstante, esta tecnología se le está cuestionando actualmente porque causa muchos problemas tales como producción de dioxinas, desecho de metales pesados y pérdidas de calor. La aplicación de la tecnología de pirolisis al tratamiento de residuos puede evitar estos problemas (Sánchez et al., 2007). Chang (2001) expone que la tecnología basada en plasma ha presentado ventajas tales como: costos más bajos, altas eficiencias en tratamiento y energía, espacio de operación más pequeño, entre otros. Algunos investigadores (Leal, 2004; Camacho, 1988) definen al plasma como un gas donde electrones, iones y especies de gas neutral coexisten. La mezcla de especies de gases neutrales y cargas es única y responden a fuerzas electromagnéticas.

Leal (2004) expone a la tecnología de plasma como una tecnología limpia, con potencial para generar energía eléctrica y otros productos derivados tales como baldosas arquitectónicas y ladrillos para construcción, lo cual la hace económicamente rentable. Explica que la antorcha de plasma opera a muy altas temperaturas, entre 5,000 y 10,000 grados centígrados, y puede procesar toda clase de basura: sólidos municipales, tóxicos, médicos, biopeligrosos, industriales y desperdicios nucleares a presión atmosférica. No produce cenizas porque a más de 5,000 grados centígrados todas las moléculas orgánicas son desintegradas y solo la mezcla de $H_2 + CO$ permanecen a altas temperaturas.

Cedzynska et al. (1999) exponen que la incineración de algunos desechos (industriales, médicos, militares) generan residuos de toxicidad relativamente alta. Los residuos tóxicos (cenizas,



escoria, depósitos de filtro, residuos de sedimentación) pueden ser fácilmente dispuestos en RESA's asumiendo que serán inmovilizados y convertidos a un producto sin lixiviados. Cuando los residuos son calentados a suficiente temperatura, sus elementos, incluyendo minerales y metales pesados tóxicos, se derriten y gasifican. Aún la solidificación parcial (vitrificación) de esos residuos requiere de temperaturas arriba de $1700\text{ }^{\circ}\text{K}$ ($1327\text{ }^{\circ}\text{C}$), la cual no está disponible en la mayoría de los incineradores pero es fácilmente alcanzable en reactores térmicos de plasma. Temperaturas del orden de los $10,000\text{ }^{\circ}\text{K}$ ($9,723\text{ }^{\circ}\text{C}$) son comunes para arcos en hornos de plasma y todos los residuos inorgánicos pueden ser solidificados.

Los desechos inorgánicos tratados con plasma se vitrifican en materiales parecidos al cristal, son altamente resistentes a la lixiviación y pueden ser usados para manufacturar agregados para la industria de la construcción. Los materiales orgánicos (plástico, papel, aceites, biomateriales, u otros) son convertidos en gas de síntesis (Syngas) que puede ser empleado como combustible en turbinas de gas avanzadas de trabajo pesado para la generación de energía eléctrica (Bodorow et al., 2005; Leal, 2004).

Burkhard et al. (1994) expresa que los hornos del plasma proporcionan la posibilidad para vitrificar los residuos no metálicos en escoria vidriosa. La aplicabilidad del plasma para la recuperación de metales de alto valor de la basura se ha demostrado y las aplicaciones están creciendo debido a las demandas actuales y futuras de regulación ambiental.

2.2.3.1. Aplicaciones

Las ventajas de los sistemas de plasma sobre los incineradores son numerosas. Si la electricidad se produce de los gases combustible, cerca del 40% serían utilizados para funcionar las antorchas del plasma y la planta y el 60% restante podrían ser vendida a la red eléctrica. Además, los requisitos para los terraplenes de la basura municipal o industrial se eliminan. En los



volúmenes de rendimiento de hasta 1.000 toneladas por día, los costos de capital del sistema de arco de plasma están casi como tecnología tradicional de la incineración. Las instalaciones prototipo para el tratamiento por plasma de los RSM, de las cenizas de incineradores, asbesto y de la basura médica han sido demostradas y comercializadas con éxito (Bodorow et al., 2005). Leal (2004) expone que la eficiencia energética de la gasificación de biomasa con plasma varía del 75 al 80% y que esto depende de la composición y la capacidad calorífica del material en bruto; el contenido de humedad y materia inorgánica reducen la eficiencia. Por esta razón, debe de hacerse un estudio de los residuos que se pretendan eliminar con la tecnología de plasma.

Investigaciones sobre incineradores de plasma ha arrojado que esta tecnología es adecuada para eliminar residuos peligrosos de forma segura. Cubas et al. (2005) desarrollaron una antorcha de plasma de flujo continuo con electrodos de grafito y un sistema integrado de nebulización para la eliminación de desechos líquidos organoclorados (tetracloruro de carbono) en una escala pequeña. Los gases de síntesis fueron recogidos e identificados por cromatografía de gas, junto con espectrometría de masa (GC-MS). La supervisión fue realizada por cromatografía de gas con detección de ionización de la llama (GC/FID). Se observó que la técnica del plasma térmico eliminó el tetracloruro de carbono totalmente y se determinó que esta técnica representa ambientalmente una alternativa correcta y conveniente, puesto que reduce la emisión total de gases organoclorados.

La Japanese Advanced Environment Equipment, JAEE, (2002) expone que la antorcha del plasma Ebara fue diseñada para desintoxicar (descomposición y eliminación de dioxinas), reduciendo, tratando y rehusando las cenizas de incineración producidas por incineradores de residuos municipales. Este sistema solucionó el problema de la disponibilidad de vertederos de ceniza y constituye una medida eficaz contra componentes del metal pesado y dioxinas en la ceniza de la incineración. La alta temperatura de derretido por el sistema de plasma reduce



perceptiblemente el volumen de la ceniza y vuelve inofensivos los componentes peligrosos de la ceniza. Información instalaciones operando esta tecnología se muestra en la Tabla 2-18.

Tabla 2-18. Instalaciones en Japón que operan con antorchas de plasma de Ebara

	Nombre	Capacidad de tratamiento (ton/día)	Fecha de terminación
1	Ciudad de Matsuyama	52	Marzo 1994
2	Ciudad de Yonago	29	Marzo 2002
3	Ciudad de Adachi-Ku	130	Octubre 2004
4	Ciudad de saga	23	Marzo 2003
5	Ciudad de Hirosaki	40	Marzo 2003

Fuente: JAEE (2002)

Katou et al. (2001) informan que en Japón, Takuma Co, LTD comenzó en 1991 a desarrollar un horno de plasma de CD que derretía por incineración RSM usando energía eléctrica generada por incineración. Una planta de prueba fue construida en 1993 con 300 kW de salida (7.2 ton/día de rendimiento), la cual fue expandida a 500 kW (12 ton/día de rendimiento) en 1995. Una planta de demostración con 1710 kW de salida y un máximo rendimiento de 25 ton/día fue construida en 1998.

Williams (2005) indica que el gobierno japonés certificó la tecnología para la construcción de una planta de tamaño comercial. Después de la demostración de la tecnología de gasificación para RSM en una planta piloto en Yoshii, Japón durante 1999-2000, se construyó una planta que fue completada en julio de 2002. Esta nueva planta usa principalmente como combustible residuos automotrices triturados, con una capacidad aproximada de 165 ton/día pero ha sido diseñada para correr con un 50% de humedad de RSM. Esta planta fue liberada para la operación comercial en abril de 2003 y puede procesar aproximadamente 300 ton/día al 100% de RSM. En diciembre de 2002, se comisionó una planta para el tratamiento del lodo de RSM y aguas residuales de las ciudades gemelas Japonesas de Mihama y Mikata. Hitachi Metals Ltd diseñó e instaló esta planta, la cual procesa 24 ton/día de RSM y 4 ton/día de lodo de aguas residuales. En



la Tabla 2-19 se muestran los experimentos recientes sobre pirolisis con plasma térmico según los reportan Huang y Tang (2007).

Tabla 2-19. Experimentos de laboratorio recientes sobre pirolisis con plasma térmico.

Tipo de plasma	Tipo de reactor/modo de alimentación sólida	Material probado	Investigador
Plasma de inducción acoplada	El polvo fue llevado adentro un flujo del gas del argón e inyectado en el centro del plasma	Polipropileno, Polietileno	R.R Guddetti
Plasma CD	Un alimentador de polvo tipo giratorio y un tipo fluidificado fueron usados para inyectar polvo de llantas hacia el plasma.	Llantas usadas	J.S. Chang
Plasma CD	Los polvos de un alimentador de tornillo fueron inyectados usando transportadores de gas hacia la zona del jet de plasma.	Polipropileno, llantas usadas	L. Tang , H. Huang
Plasma CD	Reactor de plasma de cama fluidizada; las partículas fueron agregadas al plasma o directamente en la región caliente de la cama fluidizada.	Desechos médicos	S.K. Nema
Plasma CD	Los polvos de un alimentador de tornillo fueron inyectados usando transportadores de gas hacia la zona del jet de plasma.	Residuos de la agricultura	Z. Zhao
Plasma CD	Reactor de plasma de cama de chorro; las partículas fueron agregadas directamente en la región caliente de la cama de chorro.	Residuos sólidos municipales	R.W. Beck Inc.
Plasma de Microondas	El carbón fue colocado en el medio del reactor antes de que el plasma fuera generado.	Carbón	O. Kamei

Fuente: Huang and Tang (2007)

En Estados Unidos la empresa Geoplasma-St. Lucie LLC (Geoplasma) se propone diseñar, construir, poseer y operar una instalación de conversión de residuos en energía (WTE) para la recuperación de energía procedente de residuos sólidos urbanos (RSM) que utiliza la tecnología de gasificación por plasma. Geoplasma administrará la instalación en virtud de un contrato a largo plazo (20 años de plazo con opciones de extensión) con el gobierno del condado de St. Lucie, Florida. La instalación propuesta tendrá una capacidad nominal de 600 toneladas por día (tpd) y procesará todos los RSM de la Clase I generados en el Condado St. Lucie (aproximadamente 525 toneladas por día), además de residuos adicionales de oportunidad, tales como neumáticos y lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales sanitarias generadas en el Condado. Se prevé que la planta producirá una salida eléctrica bruta de aproximadamente 22 megavatios (MW)



de energía renovable en una carga base continua (base de carga) con base en la disponibilidad superior al 85 por ciento (Golder Associates Inc., 2009).

En diciembre de 2005 se instaló un incinerador de plasma de forma experimental en las instalaciones de SIMEPRODE, en Salinas Victoria, Monterrey, Nuevo León. En una visita realizada por el autor de este trabajo en Junio de 2009 se supo que la planta se desmanteló y los resultados obtenidos de la operación se mantienen confidenciales.

2.2.3.2. Operación con RSM

Greenaction for Health and Environmental Justice, GHEJ (2006) señala que en Estados Unidos son pocas las plantas que han operado con estas tecnologías para el manejo de residuos a nivel comercial, y las dos plantas de las que hay información disponible presentan problemas:

- Allied Technology Group operaba una planta en Richland, Washington, Estados Unidos, que trataba una mezcla de residuos radiactivos y peligrosos por arco de plasma y terminó cerrando por problemas de funcionamiento del dispositivo de arco de plasma, que se sumaron a otros inconvenientes de carácter financiero.
- La planta Hawaii Medical Vitrification, operada por Asian Pacific Environmental Technologies cerca de Honolulu, también tuvo serios problemas operativos y ha incurrido en serias violaciones a las normativas locales.

Tanto la planta de Allied Technology Group como la de Hawaii Medical Vitrification usan el sistema "Fundición Asistida por Plasma" (Plasma Enhanced Melter) de la empresa Integrated Environmental Technologies (IET). IET y su compañía asociada, InEnTec, declaran en su sitio de internet que en ambas plantas la tecnología se utiliza exitosamente, pero los hechos muestran que ambos establecimientos tuvieron severos problemas con el dispositivo de arco de plasma.



InEnTec (2010) señala en su página de internet que vendió su primer sistema comercial PEM™ a ATG en 1999 para el procesamiento de mezclado desechos peligrosos y radiactivos. Fue la primera operación comercial del sistema PEM™ y también la primera instalación en Estados Unidos con permiso para recibir una mezcla de RCRA/TSCA. El sistema comenzó a funcionar en septiembre de 2000 y fue operado durante más de 13 meses antes de que problemas operativos y financieros dentro de la empresa, no vinculados al sistema PEM™, obligaron a ATG a cerrar las instalaciones y declararse en quiebra. El sistema PEM™ aún está instalado en el establecimiento, en paro total.

Los enormes costes de inversión de estas instalaciones no compensan la larga lista de problemas de funcionamiento de que disponen. Hay ejemplos en todo el mundo de plantas que han tenido que cerrar poco tiempo después de su puesta en funcionamiento. Ejemplo es la planta de Thermoselect en Karlsruhe (Alemania), uno de los incineradores por gasificación de RSM más grande del mundo, que tras sufrir continuos problemas operativos y pérdidas por valor de más de \$€ 400 millones tuvo que cerrar el 2004 (GHEJ, 2006).

La Centre d'Ecologia i Estudis Alternatius, CEPA, (2010) indica que hay que considerar que esta tecnología es muy sensible a las disfunciones del sistema. Los problemas incrementan cuando se pasa de la pequeña escala piloto a la escala de planta industrial comercial. Mantener la llama encendida 24 horas al día con el residuo a altas temperaturas desgasta el aislamiento del horno y lo mantiene sometido a constantes reparaciones. Además, los costes de explotación y construcción son muy elevados. Uno de los inconvenientes más importantes, y que contribuye significativamente a que estas tecnologías no sean todavía competitivas a nivel comercial, es que requieren de una gran cantidad de energía para alimentar la antorcha. En contra de lo que dicen sus fabricantes, el balance energético resultante es desfavorable en comparación a un incinerador de masa convencional, aunque se considere la capacidad del gas de síntesis de producir energía.



Tippayawong y Khongkrapan (2009) señalan que una de las razones principales que limita la amplia adopción de la tecnología basada en el plasma es el costo de la energía eléctrica en cuestión. Exponen que el consumo de energía necesaria para operar una antorcha de plasma de 20 kW para procesar material de desecho es cerca de 3,0 MJ/kg (0.831 kW/kg), aunque en algunos casos se han reportado valores entre 3.6-6.6 MJ/kg (1-1.833 kW/kg).

Sobre las emisiones que generan los gasificadores de plasma, Greenaction (2006) expone que Neoteric Environmental Technologies e International Environmental Solutions instalaron una planta de arco de plasma/pirólisis en Romoland, en el condado de Riverside, California. La empresa no pasó las mediciones de emisiones durante la quema de barros cloacales y fuegos artificiales, realizadas en 2004. En las pruebas que se hicieron en 2005 usando residuos sólidos urbanos, los análisis realizados por el Distrito de Manejo de la Calidad del Aire de la Costa Sur determinaron que la planta de pirolisis emite más dioxinas, NOx, compuestos orgánicos volátiles y materia en partícula que los dos grandes incineradores de residuos sólidos urbanos que existen en el área de Los Ángeles.

2.2.3.3. Observaciones

En el campo de la recuperación, con frecuencia el material residual de valor suele ser una cantidad pequeña en relación a la masa total del residuo. Es por ello que deben valorarse las tecnologías capaces de incidir de manera más contundente sobre el total. Es decir: la aplicación de una gran cantidad de energía sobre un residuo capaz de liberar el material valioso a base de fundir o evaporar el resto sin valor. La antorcha de plasma permite maximizar la transferencia de energía en los procesos donde el coste del plasma se vea compensado por el valor del material recuperado (Castells, 2000).



Garrido (1998) señala que el tratamiento por antorcha de plasma es muy caro y tan solo se utiliza para ciertas categorías especiales de residuos peligrosos (i.e. residuos clorados). Daven y Klein (2008) indican que la tecnología de arco de plasma ha probado ser un método ideal y económicamente viable para tratar exitosamente cualquier residuo cancerígeno de asbesto, residuos de plantas de energía nuclear y disponer de manera segura de residuos militares y de armas.

Castells (2000) advierte que en determinadas plantas de tratamiento se aplica el plasma para la vitrificación de las escorias procedentes de la incineración de los RSM, y que esta medida parece un poco desproporcionada si se tiene en cuenta el importe de la instalación y, sobre todo, los costos de explotación. Al respecto, Pawłowski et al. (2000) indican que la mayoría de las instalaciones que están trabajando en Japón es porque el 70% de los residuos municipales son incinerados y las cenizas no pueden ser depositadas directamente en los vertederos.

Los tratamientos por arco de plasma tienen algunas desventajas, incluyendo aquellas relacionadas a la operación a alta temperatura de la antorcha, condiciones que provocan grandes cantidades de óxidos de nitrógeno (NOx) y estimulan una actividad interior severa y agresiva en el reactor local, consumen grandes cantidades de energía y a menudo requieren reducción de tamaño o triturado de residuos sólidos para la efectividad del proceso (Keating, 2007). Pawłowski et al. (2000) indican que el proceso de plasma en una escala industrial es muy sofisticado y un sistema de paquete tecnológico de know-how.

En la producción de energía de varios tipos de tecnologías de procesos térmicos, la gasificación por arco de plasma produce cerca de 816 kWh/ton de RSM, comparados con los 685 kWh/ton para una tecnología de gasificación convencional. Por lo tanto, la gasificación por arco de plasma podría ser considerada como el proceso térmico de gasificación más eficiente (Young,



2010). No obstante, autores como McKinney y Schoch (2003) indican un potencial inconveniente que tiene la antorcha de plasma es que consume grandes cantidades de energía para destruir una cantidad significativa de residuos peligrosos.

Manheimer et al. (1997) indican que los requerimientos de energía eléctrica para la conversión de una tonelada de RSM en productos finales como sólidos vitrificados, metales, hidrogeno y gas de monóxido de carbono son de 550-790 kWh. Típicamente el 20% de los residuos iniciales se convierte en productos sólidos y el resto se convierte en gas. Young (2010) indica que los rangos de fuerza de las antorchas dependen del tamaño de las antorchas:

- Antorchas de 10-100 kW son adecuadas para trabajo en laboratorio.
- Entre 100 y 300 kW son adecuadas para proyectos piloto a escala y pequeñas aplicaciones industriales.
- Entre 200 y 900 kW ofrecen una alta temperatura de operación adecuada para aplicaciones en el procesamiento de residuos en combustibles, produciendo lingotes de silicón y recuperando metales de alto valor.
- Entre 800 y 3.000 kW son usadas en aplicaciones tal como pirolisis de residuos y recuperación de materiales. Este es usado para derretir cenizas y procesar bajos niveles de residuos nucleares.

2.2.3.4. Aspectos económicos

El costo general del tratamiento de residuos por tecnología de arco de plasma varía entre 400 y 2.000 \$USD/ton, dependiendo de las características del residuo. La tecnología de arco de plasma es sin embargo, una tecnología de capital intensivo debido a su elevado costo inicial del equipo. Una planta nueva de procesamiento de residuos por plasma puede costar entre \$USD 3-12 millones dependiendo del tamaño, la naturaleza peligrosa del residuo y la complejidad del proceso de tratamiento (Daven and Klein, 2008).



Behar (2007) indica que una planta Startech que pueda manejar hasta 2.000 toneladas de residuos diarios cuesta aproximadamente \$USD 250 millones. Si se consideran una cuota por disposición de residuos de 35 \$USD/ton, el precio del transporte de los residuos y los costos por captura de metano, la inversión pudiera pagarse en 10 años, esto sin incluir los ingresos por venta de electricidad y gas de síntesis. Nueva York ya está pagando 90 \$USD/ton para deshacerse de su basura y algunas plantas de gasificación de plasma de 2.000 toneladas por día podrían hacerlo por 36 \$USD/ton, aunque si se vende el gas de síntesis y la electricidad excedente, podría ser de 15 \$USD/ton. Slim Fast es una versión pequeña de la tecnología Startech, capaz de consumir cinco toneladas de residuos por día. Una ilustración de tal planta se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8. Planta tratadora de residuos por plasma "Slim-fast" de Startech.

Fuente: Behar (2007)

La información sobre el número de empleos generados en plantas de gasificación por plasma operando es muy escasa, debido a que los investigadores y empresas se enfocan principalmente en aspectos técnicos del proceso. Los números existentes corresponden a cifras que se exponen en proyectos sometidos a la aprobación de autoridades y residentes de las comunidades. Un caso es el que expone Learn (2010) sobre el proyecto "S4 Energy Solutions",



para una planta de gasificación por plasma con capacidad para procesar 25 toneladas de residuos, donde se espera crear hasta 16 empleos de tiempo completo.

2.3. Consideraciones legales

2.3.1. Legislación federal

Los aspectos legales a considerar en la propuesta de tratamiento de residuos para comunidades del sur del municipio de Ensenada, respecto a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente son:

- ARTÍCULO 7o.- Corresponden a los estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:
 - VI.- La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley.
- ARTÍCULO 8o.- Corresponden a los municipios, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:
 - IV.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley.
 - XIV.- La participación en la evaluación del impacto ambiental de obras o actividades de competencia estatal, cuando las mismas se realicen en el ámbito de su circunscripción territorial.



- ARTÍCULO 22 Bis. Se consideran prioritarias, para efectos del otorgamiento de los estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos de la Federación, las actividades relacionadas con:
 - I.- La investigación, incorporación o utilización de mecanismos, equipos y tecnologías que tengan por objeto evitar, reducir o controlar la contaminación o deterioro ambiental, así como el uso eficiente de recursos naturales y de energía;
 - II.- La investigación e incorporación de sistemas de ahorro de energía y de utilización de fuentes de energía menos contaminantes.
 - VII.- En general, aquellas actividades relacionadas con la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
- ARTÍCULO 41.- El Gobierno Federal, las entidades federativas y los municipios con arreglo a lo que dispongan las legislaturas locales, fomentarán investigaciones científicas y promoverán programas para el desarrollo de técnicas y procedimientos que permitan prevenir, controlar y abatir la contaminación, propiciar el aprovechamiento racional de los recursos y proteger los ecosistemas. Para ello, se podrán celebrar convenios con instituciones de educación superior, centros de investigación, instituciones del sector social y privado, investigadores y especialistas en la materia.
- ARTÍCULO 111 BIS.- Para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, se requerirá autorización de la Secretaría.

Para los efectos a que se refiere esta Ley, se consideran fuentes fijas de jurisdicción federal, las industrias química, del petróleo y petroquímica, de pinturas y tintas, automotriz, de celulosa y papel, metalúrgica, del vidrio, de generación de energía eléctrica, del asbesto, cementera y calera y de tratamiento de residuos peligrosos.

El reglamento que al efecto se expida determinará los subsectores específicos pertenecientes a cada uno de los sectores industriales antes señalados, cuyos



establecimientos se sujetarán a las disposiciones de la legislación federal, en lo que se refiere a la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Los aspectos legales a considerar en la propuesta de tratamiento de residuos para comunidades del sur del municipio de Ensenada, respecto a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos son:

Artículo 7.- Son facultades de la Federación:

- XIV. Promover la investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen, reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y la transferencia, de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes de la gestión integral de los residuos;
- XV. Promover la participación de cámaras industriales, comerciales y de otras actividades productivas, grupos y organizaciones públicas, académicas, de investigación, privadas y sociales, en el diseño e instrumentación de acciones para prevenir la generación de residuos, y llevar a cabo su gestión integral adecuada, así como la prevención de la contaminación de sitios y su remediación;
- XXI. Diseñar y promover ante las dependencias competentes el establecimiento y aplicación de incentivos económicos, fiscales, financieros y de mercado, que tengan por objeto prevenir o evitar la generación de residuos; su valorización; su gestión integral y sustentable, así como prevenir la contaminación de sitios por residuos y, en su caso, su remediación.

Los ayuntamientos por su parte, dictarán los bandos de policía y buen gobierno, los reglamentos, circulares y disposiciones administrativas que correspondan, para que en sus respectivas circunscripciones se cumplan las previsiones del presente ordenamiento.



- Artículo 10.- Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final, conforme a las siguientes facultades:
 - II. Emitir los reglamentos y demás disposiciones jurídico-administrativas de observancia general dentro de sus jurisdicciones respectivas, a fin de dar cumplimiento a lo establecido en la presente Ley y en las disposiciones legales que emitan las entidades federativas correspondientes;
 - III. Controlar los residuos sólidos urbanos;
 - VII. Verificar el cumplimiento de las disposiciones de esta Ley, normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos jurídicos en materia de residuos sólidos urbanos e imponer las sanciones y medidas de seguridad que resulten aplicables;
 - X. Efectuar el cobro por el pago de los servicios de manejo integral de residuos sólidos urbanos y destinar los ingresos a la operación y el fortalecimiento de los mismos
- Artículo 96.- Las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, con el propósito de promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, a fin de proteger la salud y prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo, deberán llevar a cabo las siguientes acciones:
 - IX. Desarrollar guías y lineamientos para la segregación, recolección, acopio, almacenamiento, reciclaje, tratamiento y transporte de residuos;
 - XI. Promover la integración, operación y funcionamiento de organismos consultivos en los que participen representantes de los sectores industrial, comercial y de servicios, académico, de investigación y desarrollo tecnológico, asociaciones profesionales y de consumidores, y redes intersectoriales relacionadas con el tema, para que tomen parte en los procesos destinados a



clasificar los residuos, evaluar las tecnologías para su prevención, valorización y tratamiento, planificar el desarrollo de la infraestructura para su manejo y desarrollar las propuestas técnicas de instrumentos normativos y de otra índole que ayuden a lograr los objetivos en la materia

- Artículo 100.- La legislación que expidan las entidades federativas, en relación con la generación, manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos podrá contener las siguientes prohibiciones:
 - I. Verter residuos en la vía pública, predios baldíos, barrancas, cañadas, ductos de drenaje y alcantarillado, cableado eléctrico o telefónico, de gas; en cuerpos de agua; cavidades subterráneas; áreas naturales protegidas y zonas de conservación ecológica; zonas rurales y lugares no autorizados por la legislación aplicable;
 - II. Incinerar residuos a cielo abierto, y
 - III. Abrir nuevos tiraderos a cielo abierto.

De acuerdo a la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética:

- Artículo 21.- Los proyectos de generación de electricidad a partir de energías renovables con una capacidad mayor de 2.5 Megawatts, procurarán:
 - I. Asegurar la participación de las comunidades locales y regionales, mediante reuniones y consultas públicas convocadas por las autoridades municipales, ejidales o comunales; en dichas reuniones deberán convenir la participación de los proyectos en el desarrollo social de la comunidad;
 - II. Según se convenga en el contrato respectivo, pagar el arrendamiento a los propietarios de los predios o terrenos ocupados por el proyecto de energía



renovable; la periodicidad de los pagos podrá ser convenida con los interesados, pero en ningún caso será inferior a dos veces por año;

- III. Promover el desarrollo social en la comunidad, en la que se ejecuten los proyectos de generación con energías renovables, conforme a las mejores prácticas internacionales y atender a la normatividad aplicable en materia de desarrollo rural sustentable, protección del medio ambiente y derechos agrarios.

2.3.2. Legislación estatal

Los aspectos legales a considerar en la propuesta de tratamiento de residuos para comunidades del sur del municipio de Ensenada, respecto a la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el estado de Baja California son:

- Art. 7, Frac. IX. La formulación de planes, programas, estrategias y acciones intersectoriales para la prevención de la generación y el manejo integral de residuos, conjugando las variables económicas, sociales, culturales, tecnológicas, sanitarias y ambientales.
- Art. 7, Frac. XII: La limitación de la disposición final en celdas de confinamiento, sólo a residuos que no sean reutilizables o reciclables o para aquellos cuyo aprovechamiento no sea económica o tecnológicamente factible.
- Art. 15, Frac. VIII. Está prohibida la mezcla de residuos sólidos urbanos con los residuos de manejo especial en las actividades separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final.
- Art. 20, Frac. I y II las plantas de separación de residuos deberán contar con contenedores para el depósito por separado de residuos destinados a la elaboración de composta y tratamientos térmicos.



- Art. 25.- La Secretaría en coordinación con los Ayuntamientos, de conformidad con el Programa Estatal, instrumentarán programas para la utilización de materiales o subproductos provenientes de los residuos a fin de promover mercados para su aprovechamiento, vinculando al sector privado, organizaciones sociales y otros agentes económicos.

Los aspectos legales a considerar en la propuesta de tratamiento de residuos para comunidades del sur del municipio de Ensenada, respecto a la Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California son:

- ARTÍCULO 14.- Para la formulación, evaluación y ejecución de la política ambiental y sus instrumentos previstos en esta Ley, y en las demás disposiciones en materia de prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente en el territorio del estado, además de los que establece la Ley General, se observarán los siguientes principios:
 - XVIII. Las autoridades promoverán la formación de un mercado de materiales y residuos reutilizables y reciclables;
- ARTÍCULO 38.- Se considerarán prioritarias, para efectos de la aplicación de instrumentos económicos, las actividades relacionadas con:
 - II. La investigación, desarrollo, incorporación y utilización de mecanismos, equipos y tecnologías que tengan por objeto evitar, reducir o controlar la contaminación o deterioro ambiental, así como el uso eficiente de energía y recursos naturales;
 - V. La investigación e incorporación de sistemas de ahorro de energía y de uso de fuentes de energía más eficientes y menos contaminantes;
 - VI. La fabricación, instalación y mantenimiento de equipos de control y tratamiento de residuos, aguas residuales y en general, de contaminantes de la atmósfera, agua y suelo.



- ARTÍCULO 103.- la Secretaría en coordinación con los municipios y demás dependencias buscarán estimular en la población el uso de energía alternativa, fomentando la utilización de todas aquellas fuentes que representen un menor impacto al medio ambiente, tales como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la generada por la combustión o digestión de materia orgánica.

2.3.3. Estímulos al desarrollo de tecnologías

La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en el Artículo 18 señala que para impulsar, desarrollar e incentivar la producción de los Bioenergéticos, las Secretarías y los Gobiernos de las entidades federativas y del Distrito Federal, en el ámbito de sus respectivas competencias promoverán la creación de infraestructura para la producción de Bioenergéticos.

Los incentivos estarán dirigidos a personas que contribuyan al desarrollo de la industria de los Bioenergéticos y a la modernización de su infraestructura, a través de la fabricación, adquisición, instalación, operación o mantenimiento de maquinaria para la producción de Bioenergéticos. Asimismo, considerarán a aquellas personas que realicen investigaciones de tecnología, cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, aguas, suelos, sitios, así como la innovación tecnológica en las plantas de producción de Bioenergéticos.

En la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), Artículo 2o., se establece que el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable y el uso de tecnologías limpias es de utilidad pública y se realizará en el marco de la estrategia nacional para la transición energética mediante la cual el Estado Mexicano promoverá la eficiencia y sustentabilidad energética, así como la reducción de la dependencia de los hidrocarburos como fuente primaria de energía. El Reglamento de esta ley establecerá los



criterios específicos de utilización de las distintas fuentes de energías renovables, así como la promoción para la investigación y desarrollo de las tecnologías limpias para su aprovechamiento.

En el Artículo 22 de la LAERFTE se establece la estrategia como el mecanismo mediante el cual el Estado Mexicano impulsará las políticas, programas, acciones y proyectos encaminados a conseguir una mayor utilización y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias, promover la eficiencia y sustentabilidad energética, así como la reducción de la dependencia de México de los hidrocarburos como fuente primaria de energía.

En el Artículo 25 de la LAERFTE se indica que el Ejecutivo Federal, al enviar a la Cámara de Diputados el proyecto de Decreto de Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal que corresponda, consolidará los recursos del sector público que proponga establecer dentro de la Estrategia.

En el transitorio Décimo Primero de la LAERFTE se expresa que en el Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal 2009, se destinarán tres mil millones de pesos para el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. Además, para cada uno de los ejercicios fiscales del 2010 y 2011, el monto propuesto en el proyecto de Decreto de Presupuesto de Egresos de la Federación para el Fondo a que se refiere el artículo 27 de esta Ley será de tres mil millones de pesos. El monto anterior deberá actualizarse por la variación esperada del Índice Nacional de Precios al Consumidor entre 2009 y el año que se presupuesta.

Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California, en su artículo 103 expone que la Secretaría en coordinación con los municipios y demás dependencias buscarán estimular en la población el uso de energía alternativa, fomentando la utilización de todas aquellas fuentes



que representen un menor impacto al medio ambiente, tales como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la generada por la combustión o digestión de materia orgánica.

2.3.4. Autoridades competentes relacionadas

En la implementación de tecnologías de tratamiento de residuos con recuperación de energía, se debe atender lo dispuesto en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, puesto que en el Artículo 2, párrafo II de dicha ley se consideran como Bioenergéticos a los residuos domésticos:

II. Bioenergéticos: Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de esta Ley; atendiendo a lo dispuesto en el artículo 1 fracción I de este ordenamiento

2.3.4.1. Secretaría de Energía (SENER)

De acuerdo al de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos:

- Artículo 12.- Para los efectos de la presente Ley, la SENER tendrá las siguientes facultades:
 - II. Regular y, en su caso, expedir Normas Oficiales Mexicanas sobre los requisitos, características, medidas de seguridad y demás aspectos pertinentes, en relación con la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos, así como controlar y vigilar su debido cumplimiento;
 - III. Otorgar y revocar permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la distribución por ductos, así como la comercialización de Bioenergéticos;



- IV. Emitir los criterios y lineamientos para el otorgamiento de los permisos a que se refiere la fracción anterior;
 - V. Expedir la regulación necesaria para promover el uso de las tecnologías más adecuadas para la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos;
 - XII. Imponer las sanciones por infracciones a la presente Ley y las demás disposiciones que deriven de la misma, en lo relativo a la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos.
- Artículo 24.- Las actividades y servicios relacionados con la producción, el almacenamiento, el transporte y la distribución por ductos, así como la comercialización de Bioenergéticos, se sujetarán a permiso previo de la SENER, salvo aquellos que expresamente se excluyan en los criterios y lineamientos a que se refiere la fracción IV del artículo 12 de esta Ley. La SENER informará a la Comisión de Bioenergéticos sobre los permisos que haya otorgado.

De acuerdo a la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética:

- Artículo 7o.- Sin perjuicio de las que su propia ley le otorga, la Comisión Reguladora de Energía tendrá las atribuciones siguientes:
 - I. Expedir las normas, directivas, metodologías y demás disposiciones de carácter administrativo que regulen la generación de electricidad a partir de energías renovables, de conformidad con lo establecido en esta Ley, atendiendo a la política energética establecida por la Secretaría;
 - II. Establecer, previa opinión de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y la Secretaría de Energía, los instrumentos de regulación para el cálculo de las



contraprestaciones por los servicios que se presten entre sí los Suministradores y los Generadores;

- Artículo 8o.- El Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Energía podrá suscribir convenios y acuerdos de coordinación con los gobiernos del Distrito Federal o de los Estados, con la participación en su caso de los Municipios, con el objeto de que, en el ámbito de sus respectivas competencias:
 - I. Establezcan bases de participación para instrumentar las disposiciones que emita el Ejecutivo Federal de conformidad con la presente Ley;
 - II. Promuevan acciones de apoyo al desarrollo industrial para el aprovechamiento de las energías renovables;
 - III. Faciliten el acceso a aquellas zonas con un alto potencial de fuentes de energías renovables para su aprovechamiento y promuevan la compatibilidad de los usos de suelo para tales fines;
 - IV. Establezcan regulaciones de uso del suelo y de construcciones, que tomen en cuenta los intereses de los propietarios o poseedores de terrenos para el aprovechamiento de las energías renovables, y
 - V. Simplifiquen los procedimientos administrativos para la obtención de permisos y licencias para los proyectos de aprovechamiento de energías renovables.

2.3.4.2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

De acuerdo al Artículo 13 de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la SEMARNAT tendrá las siguientes facultades:

- I. Prevenir, controlar o evitar la contaminación de la atmósfera, aguas, suelos y sitios originada por las actividades de producción de Insumos y de Bioenergéticos, así como las descargas de contaminantes a los cuerpos de aguas nacionales que se generen por las mismas;



- II. Evaluar y en su caso autorizar en materia de impacto ambiental las instalaciones para la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución y la comercialización de Bioenergéticos, de conformidad con las disposiciones legales aplicables;
- V. Evaluar los aspectos de sustentabilidad de los programas derivados de la presente Ley para el desarrollo de la producción de Insumos y de Bioenergéticos, así como el impacto de dichos programas y en consecuencia tomar las medidas correspondientes a los resultados obtenidos;
- VI. Regular y, en su caso, expedir Normas Oficiales Mexicanas relativas a los requisitos, características, medidas de seguridad y demás aspectos que considere pertinentes, para asegurar la protección al medio ambiente, en relación con las actividades previstas en esta ley, así como vigilar su debido cumplimiento, y
- VII. Vigilar e inspeccionar el cumplimiento de las Leyes y disposiciones en materia ambiental, así como ordenar medidas de seguridad y sancionar por infracciones a las mismas, que deriven de acciones relacionadas con la aplicación de la presente Ley.

2.3.5. Restricciones Legales a la Incineración de los Residuos

México cuenta a nivel federal con un marco jurídico general para la prevención y gestión integral de los residuos, que se sustenta en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Este marco incluye a la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los reglamentos correspondientes, así como las Normas Oficiales Mexicanas que se aplican en todo el territorio. Asimismo, aplican como legislación nacional una serie de Tratados Internacionales que el Gobierno de México ha suscrito con la aprobación del Senado, entre los que se encuentran el Convenio de



Basilea, sobre movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su disposición; el Convenio de Estocolmo, sobre contaminantes orgánicos persistentes, el Protocolo de Kyoto, sobre cambio climático y el Protocolo de Montreal, sobre sustancias que deterioran la capa de ozono, de los cuales se derivan una serie de obligaciones relacionadas directa o indirectamente con la gestión y manejo de los residuos (SEMARNAT, 2007).

El convenio de Estocolmo, del que México es Parte y que fue suscrito el 22 de mayo de 2001, identifica entre las fuentes potenciales de liberación al ambiente de COP's no intencionales, como las dioxinas y furanos, a los incineradores de los diferentes tipos de residuos y a la quema de basura a cielo abierto y en vertederos. Por lo anterior, en las "Directrices sobre Mejores Técnicas Disponibles y orientación provisoria sobre Mejores Prácticas Ambientales según el Artículo 5 y el Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes" se presta particular atención a la gestión de los residuos, algunos de cuyos aspectos relevantes a considerar aparecen citados a continuación (Cortinas, 2006).

En algunas situaciones, la decisión de construir una nueva instalación de tratamiento de desechos en gran escala, como es el caso de un nuevo incinerador, un nuevo relleno sanitario o una nueva planta de tratamiento mecánico o biológico, tenderá a minar los esfuerzos en materia de minimización de residuos o de recuperación de recursos derivados de éstos. Los que invierten en estas nuevas instalaciones se verán presionados, a menudo, para asegurar un ingreso suficiente de desechos que les permita recuperar sus inversiones. Cuando ello ocurre, la nueva instalación puede convertirse en un contrapeso y un desincentivo en lo relativo a los esfuerzos dirigidos a la minimización de residuos. Por tal motivo, toda consideración al respecto debe ser llevada a cabo dentro del marco de las políticas holísticas de gestión/manejo de desechos.

Por estas y otras razones, las Partes del Convenio de Estocolmo deben contemplar la necesidad de seguir políticas y prácticas que apunten a minimizar la generación de desechos, ya que ello puede contribuir a evitar y reducir los vuelcos y quemas a cielo abierto, como así también proveer a menudo alternativas preferibles a la construcción de nuevas instalaciones de tratamiento.



Cortinas (2008) indica que tanto la legislación como la política en la materia, alientan la prevención de la generación, la reutilización y el reciclado y establecen restricciones importantes a la incineración y a la disposición final de los residuos, de conformidad con las obligaciones que derivan para México de la adopción de Convenios Internacionales en la materia, como los de Estocolmo y Basilea.

Los artículos que regulan la aplicación de tratamientos térmicos a los residuos en la Ley General para La Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) son los siguientes:

- Artículo 61.- Tratándose de procesos de tratamiento por incineración y tratamiento térmico por termólisis, la solicitud de autorización especificará las medidas para dar cumplimiento a las normas oficiales mexicanas que se expidan de conformidad con los convenios internacionales de los que México sea parte.
- Artículo 62.- La incineración de residuos, deberá restringirse a las condiciones que se establezcan en el Reglamento y en las normas oficiales mexicanas correspondientes, en las cuales se estipularán los grados de eficiencia y eficacia que deberán alcanzar los procesos, y los parámetros ambientales que deberán determinar se a fin de verificar la prevención o reducción de la liberación al ambiente de sustancias contaminantes, particularmente de aquellas que son tóxicas. En los citados ordenamientos se incluirán especificaciones respecto a la caracterización analítica de los residuos susceptibles de incineración, así como de las cenizas resultantes de la misma, y al monitoreo periódico de todas las emisiones sujetas a normas oficiales mexicanas, cuyos costos asumirán los responsables de las plantas de incineración.
- La Secretaría, al establecer la normatividad correspondiente, tomará en consideración los criterios de salud que al respecto establezca la Secretaría de Salud.
- Artículo 63.- La Secretaría, al reglamentar y normar la operación de los procesos de incineración y co-procesamiento de residuos permitidos para tal efecto, distinguirá aquellos



en los cuales los residuos estén sujetos a un co-procesamiento con el objeto de valorizarlos mediante su empleo como combustible alternativo para la generación de energía, que puede ser aprovechada en la producción de bienes y servicios.

- Deberán distinguirse los residuos que por sus características, volúmenes de generación y acumulación, problemas ambientales e impactos económicos y sociales que ocasiona su manejo inadecuado, pudieran ser objeto de co-procesamiento. A su vez, deberán establecerse restricciones a la incineración, o al co-procesamiento mediante combustión de residuos susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos, cuando éstos estén disponibles, sean ambientalmente eficaces, tecnológica y económicamente factibles. En tales casos, deberán promoverse acciones que tiendan a fortalecer la infraestructura de valorización o de tratamiento de estos residuos, por otros medios.

Respecto a la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el estado de Baja California, las restricciones a los tratamientos térmicos se encuentran en los siguientes artículos:

- Art. 16.- La valorización de los residuos sólidos y de manejo especial comprende los procesos de composta, reutilización, reciclaje, así como los demás que busquen recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que lo componen y prevenir riesgos a la salud humana y al ambiente.
- Art. 24.- La determinación de la conveniencia de someter a tratamiento térmico residuos sólidos urbanos o de manejo especial, deberá sustentarse en el diagnóstico básico de los residuos que se generan en la entidad y de la disponibilidad y factibilidad técnica y económica de otras alternativas para su valorización o tratamiento por otros medios. En todo caso, los residuos antes señalados sólo podrán ser sujetos a tratamientos térmicos autorizados por la federación y cuyo desempeño ambiental sea acorde a lo dispuesto en la ley general, las normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos aplicables.



En el Artículo 2, párrafo XIV de Ley de Protección al Ambiente para el Estado de B.C., se define como Mejor Tecnología Disponible al conjunto de equipos, dispositivos, mecanismos, técnicas o sistemas, que aplicados a una fuente o proceso generador de contaminantes, logra la mayor reducción, minimización o eliminación de dichos contaminantes, o reduce su grado de peligrosidad, comparada con otras tecnologías usuales. Se entiende asimismo, que su implementación es técnicamente factible, que es posible su adquisición en el mercado regional, y que su costo es razonablemente comparable a tecnologías usuales, tradicionales o análogas

2.4. Sustentabilidad

Es una de las palabras más ampliamente usadas actualmente en el mundo, pero el análisis de la evolución de tal como concepto es un ejercicio difícil. Hasta los finales de los 70's, la palabra sustentable fue ocasionalmente empleada y tradicionalmente ha sido usada como sinónimo de palabras tales como "largo plazo", "durable", "sano" o "sistemático" (Leal, 2000).

La sustentabilidad puede tener muchos significados dependiendo de cómo sea vista (Devuyst et al., 2001; Leal, 2000). Algunas definiciones propuestas para sustentabilidad se muestran a continuación:

- Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades (Brundtland, 1987).
- Tipo de desarrollo el cual es socialmente justo, éticamente aceptable, moralmente justo y económicamente viable (Leal, 2000).
- Es un proyecto de sociedad que se dirige a desarrollar actividades económicas dentro de la capacidad de carga del ecosistema local de tal forma que la población local se beneficie en su conjunto, mientras preserva el bienestar de las futuras generaciones y personas en otros lugares (Devuyst et al., 2001).



- Un producto o proceso sustentable es aquel en el que las restricciones de consumo de recursos y generación de residuos están a un nivel aceptable, hace una contribución positiva para la satisfacción de las necesidades humanas, y proporciona un valor económico perdurable para la empresa (Dinh et al., 2009).

Springett (2003) expone que mucha de la confusión asociada con el término se centra en el rol del crecimiento económico y la forma radicalmente diferente de las economías que llaman a la sustentabilidad.

2.4.1. La evaluación de la sustentabilidad

El término evaluación de la sustentabilidad (ES) se utiliza tanto en la literatura y la práctica en dos contextos muy diferentes: a) en el primero se utiliza en el contexto de comprobar si una comunidad u organización está avanzando hacia la sustentabilidad; b) en el segundo sirve más bien como procesos de evaluación del impacto en la medida en que los intentos de evaluar la sustentabilidad de los proyectos propuestos, de planes, políticas o de la legislación antes de su ejecución (Adinyira et al., 2007).

La ES puede ser definida como el proceso formal de identificación, predicción y evaluación de los impactos potenciales de un amplio rango de iniciativas relevantes –tales como legislación, regulaciones, políticas, planes, programas y proyectos específicos- y sus alternativas en el desarrollo sustentable de una sociedad. Esta herramienta, que incluye un reporte escrito sobre los hallazgos en la ES, puede ayudar en la toma de decisiones y a los encargados de formular políticas a decidir cuales acciones deberían o no tomar en un intento de hacer la sociedad más sostenible (Devuyst et al., 2001). En la Tabla 2-20 se expone brevemente algunas investigaciones desarrolladas en el tema de la ES y se indican las observaciones relacionadas con la aplicación de los métodos.



Tabla 2-20. Investigaciones y métodos de evaluación aplicados

Investigador	Tema a investigar	Metodología empleada	Observaciones
(Dinh et al., 2009)	ES de Biodiesel	Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés)	La evaluación se hace principalmente sobre aspectos técnicos. En el análisis no se observa una clara integración de aspecto cualitativo en la evaluación. El mismo autor concluye que las políticas pueden afectar "dramáticamente" la decisión final.
(Banar et al., 2009)	Opciones de manejo de residuos sólidos	Evaluación de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés)	En este estudio de alternativas de gestión de residuos sólo se investigaron desde un punto de vista medioambiental. Por esa razón, este puede ser soportado con otros instrumentos de toma de decisiones que consideren los efectos económicos y sociales de la gestión de residuos sólidos.
(Kirkeby et al., 2006)	Evaluar los recursos consumidos e impactos ambientales de los sistemas de manejo de residuos	Evaluación de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés)	La evaluación se hace principalmente sobre aspectos ambientales. En el análisis no se observa la integración de aspectos cualitativos en la evaluación. . Por esa razón, este puede ser soportado con otros instrumentos de toma de decisiones que consideren los efectos económicos y sociales de la gestión de residuos sólidos.

2.4.2. Herramientas para la evaluación de la sustentabilidad

La necesidad de buscar la sustentabilidad ha llevado a la creación de diversas herramientas para su evaluación. Investigadores (Jensen y Elle, 2007; Devuyt et al., 2001) exponen que la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), la Evaluación Estratégica Ambiental (SEA), Análisis del Ciclo de Vida (LCA), Evaluación del Impacto Social (SIA) y Evaluación del Impacto a la Salud (HIA), huella ecológica, cuenta verde, métodos de evaluación de criterios múltiples, sistemas de indicadores, los marcos, directrices para la sostenibilidad urbana y otros, son ejemplos de estas herramientas

Adinyira et al. (2007) exponen que, sobre la base de sus fundamentos metodológicos, los métodos de evaluación se pueden sintetizar en tres grupos: métodos del medio ambiente en general, métodos de evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) y métodos de evaluación de indicadores de sustentabilidad.



Cuando se decida que metodología utilizar durante la evaluación de la sustentabilidad, es necesario tener en cuenta las limitaciones a las cuales todas las clases de evaluaciones de impacto se enfrentan: a) cantidad limitada de tiempo para hacer el estudio, b) recursos financieros limitados y c) dificultades en la recolección de datos. En cualquier caso, la metodología usada debe entregar resultados los cuales sean útiles para decidir cuáles son los pasos a tomar para el futuro y deben ser entendibles por tantas personas como sea posible, con el fin de motivar la participación del público en la evaluación de la sustentabilidad (Devuyst et al., 2001).

2.4.3. Métodos del medio ambiente en general.

Se centran principalmente en evaluar cuestiones medioambientales tales como el consumo de recursos, la contaminación y el impacto sobre la biodiversidad. Con estas metodologías, los impactos ambientales tienden a ser identificados principalmente con listas de control o matrices, y evaluaciones como el marco lógico, análisis costo-eficacia y evaluación de criterios múltiples. Los métodos de evaluación ambiental tal como análisis costo-beneficio, valoración contingente, precios hedónicos y los métodos de costo de viaje, todos ellos tienen su fundamento metodológico en la evaluación ambiental. En su mayoría se limita a las aplicaciones en los niveles de las políticas de planificación, programas de desarrollo y diseño urbano (Adinyira et al., 2007). En la Tabla 2-21 se muestran aplicaciones de este tipo de herramientas.

Los métodos Eco-ciclos y Eco-balances ofrecen a los funcionarios residentes y municipales la comprensión de los posibles impactos ambientales de las alternativas de desarrollo mediante el análisis de los flujos de materiales y energía en la ciudad. Eco-balances identifica los desequilibrios existentes o potenciales en estos flujos. Eco-ciclo refiere al hecho de que toda la materia en la Tierra se utiliza una y otra vez. En los sistemas urbanos se centra la atención en: 1) el reciclaje de materiales y energía en los procesos urbanos y los sistemas construidos, y los flujos de entrada y



salida de los materiales generados por las actividades humanas, y 2) los impactos de los procesos urbanos a los ciclos naturales (Devuyst et al., 2001).

Tabla 2-21 Selección de herramientas de evaluación ambiental.

Herramienta de evaluación	Propósito	Aplicación (ejemplo)
Auditoría ambiental	Evaluar el actual desempeño ecológico y establecer objetivos para el desempeño ambiental futuro de una compañía.	Auditoría de una planta de reciclaje (reporte de situación y objetivos).
Evaluación de impacto ambiental	Análisis de impactos ambientales potenciales de una nueva planta o actividad relacionada a su localización (prognosis)	Seleccionar un nuevo sitio de relleno sanitario y estimar sus impactos sobre el ambiente local.
Evaluación de ciclo de vida	Comparación de productos/actividades con la misma función, identificación de debilidad dentro del ciclo de vida de un producto o proceso; identificación de mejoras potenciales, eco etiquetado.	Comparación de diferentes sistemas de empaquetado. Identificación de procesos contaminantes clave cuando tratan 1 kg de RSM promedio. Eco etiquetas de empaque.
Evaluación de riesgos	Acoplamiento cuantitativo del impacto de un evento o cadena de eventos con sus posibilidades de ocurrencia.	Evaluación de posibles fallas y sus probabilidades de incineración de RSM; riesgos de depósitos en subsuelos.
Análisis del flujo de material/substancias	Identificación de flujo de problemas y causas de problemas ambientales en una región; vigilancia; incitación para regulación de sustancias; evaluación de medidas de reducción.	Análisis de flujos de Cd y almacenamiento dentro de una región para encontrar los más prometedores potenciales de reducción.

Fuente: Ludwig et al. (2003)

2.4.4. Métodos de ciclo de vida (LCA)

Estos métodos intentan abordar temas de sustentabilidad más amplios, tales como: los límites ambientales, lo concerniente a equidad social y la necesidad de participación de los interesados. No obstante, estos métodos frecuentemente abordan temas sociales o económicos usando enfoques de los métodos ambientales generales. Se basan en una metodología estructurada que pueden utilizarse para evaluar el impacto del desarrollo urbano a través de su ciclo de vida. Algunos investigadores (Ludwig et al., 2003; Rizo, 2002) exponen que el LCA es una herramienta que evalúa el impacto potencial sobre el medioambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida (de la cuna a la tumba) mediante la cuantificación del uso de recursos como energía, materias primas, agua (entradas) y de emisiones medioambientales al aire, agua y suelo (salidas), asociados con el sistema que se está evaluando.



Villeneuve et al. (2009) exponen que los LCA se basan generalmente en un inventario de todos los flujos de recursos, energía y emisiones que componen cada uno de los elementos de las operaciones individuales encontradas en el sistema, incluyendo no sólo el funcionamiento de los procesos de manejo de residuos, sino también de las contribuciones de los principales procesos relacionados. Los métodos basados en LCA han sido a veces criticados por no ser suficientemente transparentes, ya que pueden basarse en los parámetros por defecto que no son de fácil acceso para el usuario, o por ser a veces tan amplios en su alcance que puede ser difícil de aplicar (por ejemplo, a los sistemas de manejo de residuos). Bajo esta metodología, algunas herramientas de software para comparar diferentes estrategias de manejo de residuos han sido desarrolladas (WISARD, SIMA PRO y EASEWASTE).

Ludwig et al. (2003) exponen que la metodología LCA consta de 4 fases: (a) definición de metas y alcances, el propósito del estudio y los límites son discutidos; (b) fase de Inventario de ciclo de vida (LCI), que comprende la recolección de emisiones y uso de recursos; (c) fase de evaluación de impactos del ciclo de vida (LCIA), los impactos ambientales potenciales de esas emisiones y el consumo de recursos son cuantificados; y (d) fase de interpretación, las conclusiones son señaladas. Las cuatro fases del LCA son pasos iterativos (ver Figura 2-9); las metas y definición de alcance podrían ser revisadas en el proceso de recolección de datos (LCI) o evaluación de impactos (LCIA).

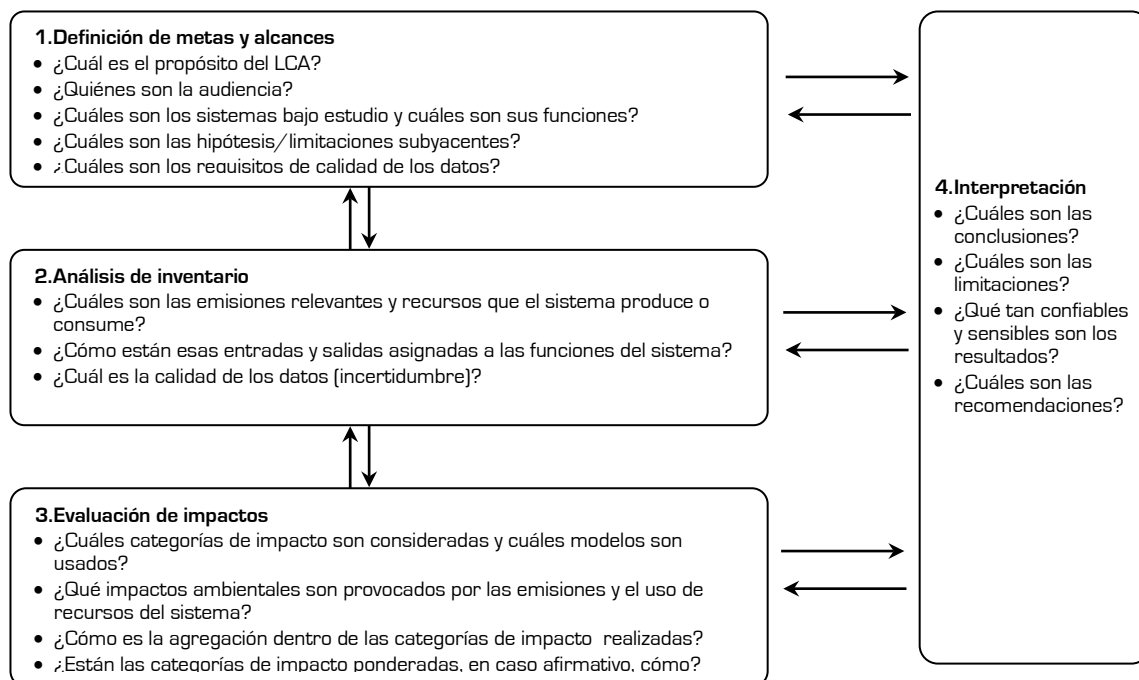


Figura 2-9. Estructura LCA y preguntas en cada fase.

Fuente: Ludwig et al. (2003)

2.4.5. Métodos de indicadores de sustentabilidad.

Desde un punto de vista metodológico, los indicadores de sustentabilidad se reconocen como métodos de integración de herramientas útiles para evaluar la situación en varias dimensiones y para poner a prueba la sustentabilidad. Los métodos desarrollados sobre la base de medio ambiente en general y de LCA no han logrado analizar, integrar y presentar la información social y económica o los tomadores de decisiones. En vista de ello, los indicadores de sustentabilidad pretenden integrar los problemas y buscar sus efectos acumulativos y sinérgicos sobre el medio ambiente y utilizar una amplia gama de indicadores para caracterizar las diferentes dimensiones o aspectos de desarrollo urbano. En virtud de ello, la evaluación de la sostenibilidad es actualmente considerada como una evaluación de los indicadores por los cuales las personas pueden realizar un seguimiento de su progreso hacia la sostenibilidad (Adinyira et al., 2007).



2.4.5.1. Análisis posicional

Clayton et al. (1996) proponen la utilización del análisis posicional para aclarar las opciones que deben tomarse en el proceso de toma de decisiones. El objetivo de cualquier proceso de toma de decisiones es, después de tomar en cuenta los hechos pertinentes, llegar a una decisión clara que da a la persona o la organización la mejor oportunidad de alcanzar los objetivos elegidos. El análisis posicional tiene por objeto tomar decisiones de manera más explícita por la forma de representación de la información y aclarar las cuestiones y opciones como:

- La identificación de las condiciones relevantes, factores y dimensiones cuando se trata de un problema compuesto o la realización de una decisión estratégica.
- Establecer procedimientos para la cuantificación, medición, clasificación o de otro cambio de prioridades en cada una de estas dimensiones.
- Medición o calificación de las opciones o escenarios en términos de cambio en cada dimensión.
- Identificación de los compromisos de cada una de las dimensiones pertinentes.
- De tomar una decisión sobre la base del perfil general de cada opción, que puede implicar la asignación de pesos a cada dimensión.

Los productos de un análisis posicional pueden ser presentados en forma gráfica, haciéndola más accesible. Un mapa de evaluación de sustentabilidad (Sustainability Assessment Map, SAM) consiste en un diagrama (ver Figura 2-10) en el cual cada una de las dimensiones importantes en un problema complejo es representada por medio de un eje. Mediciones de cambio o indicaciones de prioridades son mapeadas en los ejes. El perfil resultante puede ser usado para representar la situación actual. Posibles escenarios futuros o resultados de la situación son empleados para generar perfiles más lejanos (Clayton et al., 1996). Sus propósitos son:

- Ayudar a identificar el grado de los efectos implicados por cada decisión;

- Clarificar los balances implícitos en cada decisión estratégica;
- Hacer todas las partes del proceso de toma de decisiones claro y explícito;
- Servir como una herramienta educativa.

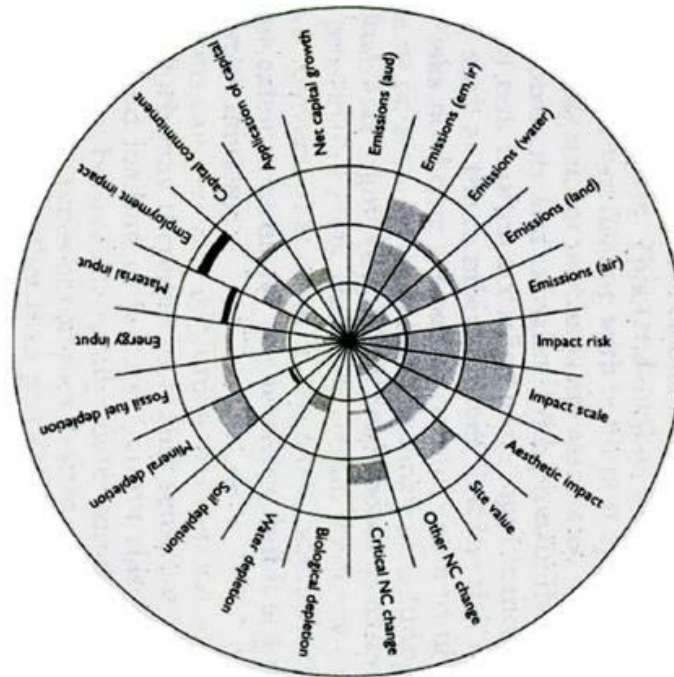


Figura 2-10. Ejemplo de SAM

Fuente: Clayton et al. (1996)

Otra forma gráfica de presentar los indicadores de sustentabilidad es a través del diagrama AMOEBA (ver Figura 2-11). Debido a que las autoridades y tomadores de decisiones requieren una presentación simple y clara, más que modelos científicos, los múltiples índices de sustentabilidad se resumen en un diagrama. La condición de referencia puede ser un valor único para un indicador o índice, o podría ser un rango deseable (una banda). No obstante, la selección de una condición de referencia para indicadores de sustentabilidad podría no ser un proceso fácil. Ejemplo de ello sería la falta de experiencia de indicadores individuales y su interpretación, un conjunto de acuerdos nacionales para la mayoría de los indicadores y mecanismos de consenso para el establecimiento de estándares (Bell y Morse, 2008)

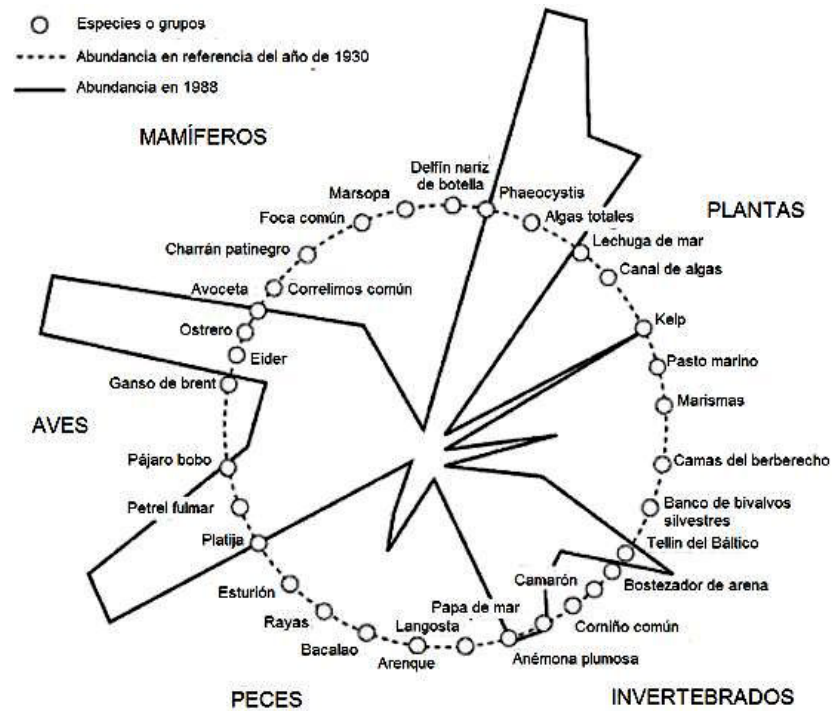


Figura 2-11. Diagrama AMOEBA

Fuente: Bell y Morse, (2008)

Algunos autores han usado un estado histórico para el sistema como una condición de referencia (un sistema de referencia histórico). Una alternativa para el uso de un año de referencia es comparar el sistema con uno existente actualmente y suponer que es sustentable, o al menos para tener un mejor "sistema de salud". También se pueden tomar diferentes aproximaciones y preguntarles a los interesados lo que ellos piensan que debe ser la condición de referencia. Naturalmente puede ser mucha subjetividad inherente y los juicios de valor en tales sistemas de referencia de los interesados y opiniones pueden ser diversas (Bell y Morse, 2008).

2.4.5.2. Problema en contexto

En la metodología del *problema en contexto*, un "triple contexto" de los problemas ambientales se introduce: normativo, físico y social. Analizar el contexto social comienza con los agentes llevando a cabo las actividades de la problemática, sus opciones y motivaciones, y procede a más actores y los factores que influyen en estas opciones y motivaciones. Mediante este



proceso, uno identifica las opciones sociales para solucionar el problema ambiental. Las opciones sociales, con las opciones técnicas identificadas en el análisis físico-ciencia, puede alimentar en el proceso de diseñar y evaluar políticas y proyectos del medio ambiente. Este método es de interés en un contexto de sostenibilidad, ya que no se ve en el problema de manera aislada, sino trata de encontrar explicaciones por la búsqueda de enlaces y colocar el problema en su contexto. Para ser útil en la evaluación de la sustentabilidad, el método debe ampliarse para estudiar no sólo los problemas ambientales y las políticas ambientales, sino a todo tipo de actividades humanas en un marco sustentable (Devuyst et al., 2001).

2.4.5.3. Análisis de sistemas

El Consejo Internacional para Iniciativas Ambientales Locales, ICLEI, (1996) expone que el *análisis de sistemas* permite conocer con mayor detalle el funcionamiento de los sistemas sobre los que dependen las actividades. Para ello se centra en el carácter interdependiente de los sistemas de recursos naturales, construcción, sociales y económicos que apoyan a una comunidad o un particular sistema de servicio. Al cambiar el énfasis de la evaluación a la comprensión de los sistemas que se están desarrollando o modificando, el análisis de sistemas ayuda a los planificadores en la dirección de la capacidad a largo plazo de una comunidad para satisfacer sus necesidades.

2.4.5.4. Proceso de jerarquía analítica (AHP)

Los métodos de decisión multicriterio apoyan a la toma de decisiones complejas en escenarios de múltiples criterios de selección. Estos métodos persiguen eliminar las conjeturas improvisadas, el pensamiento no explicado, injustificado e intuitivo que en ocasiones acompaña a la mayoría de las decisiones que se toman con respecto a problemas complejos (Martínez,



2007). Entre los métodos de decisión multicriterio más conocidos se encuentra el Proceso de Jerarquía Analítica o AHP (Analytic Hierarchy Process).

El AHP es un método para la toma de decisiones en situaciones en las que están presentes múltiples objetivos y es una de las técnicas más adecuadas en la toma de decisiones para el desarrollo de la sustentabilidad, ya que permite una mejor, más fácil y más eficaz de identificación de los criterios de selección, ponderación y análisis. Además ayuda a entender tanto la medición de la evaluación subjetiva y objetiva, ofreciendo un mecanismo útil para el control de la coherencia de las medidas de evaluación y alternativas (Dinh et al., 2009). Este método permite adicionalmente realizar el análisis de sensibilidad, para observar y estudiar otras posibles soluciones al hacer cambios en la importancia de los elementos que definen el problema de decisión (Martínez, 2007). El resultado de este método es un ranking de prioridades o ponderación de cada alternativa

Fundamentalmente, el AHP trabaja desarrollando prioridades para alternativas y los criterios usados para evaluar las alternativas. Los criterios son seleccionados por un tomador de decisiones y pueden ser medidos sobre diferentes escalas, tales como peso y longitud; o pueden ser intangibles para los cuales la escala no existe aún. Con el AHP un problema de escalas multidimensionales puede ser transformado a un problema de escala unidimensional (Schmoldt et al., 2001). Martínez (2007) indica que la construcción de un AHP se fundamenta en cuatro etapas que se describen a continuación.

1. *Formulación del problema de decisión en una estructura jerárquica.* En esta etapa es en la que el decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes. La jerarquía básica está conformada por una meta u objetivo general, criterios y alternativas. La Figura 2-12 muestra un esquema del modelo jerárquico.

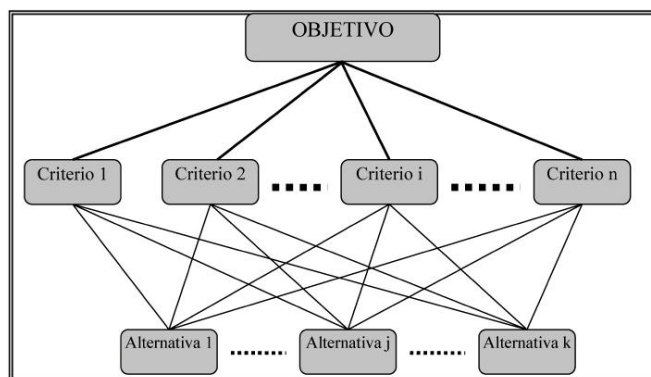


Figura 2-12. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP

Fuente: Martínez, 2007

2. *Valoración de los elementos.* Los tomadores de decisiones emiten juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas en términos de importancia, preferencia o probabilidad, de un elemento frente a otro, respecto de un atributo, o bien, si es en el último nivel de la jerarquía, de una propiedad o cualidad común (ver Tabla 2-22). Los juicios pueden estar guiados por información científica, técnica y la dada por la experiencia y conocimientos del decisor útiles para evaluar los diferentes componentes del modelo. El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada “Matriz de comparaciones pareadas”.

Tabla 2-22 Escala de Medidas de Saaty

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente a otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Fuente: Martínez (2007)



3. *Priorización y síntesis.* El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento. En un problema jerarquizado se pueden definir distintos tipos de prioridades: locales, globales y totales. La prioridad total de las alternativas comparadas se obtiene mediante la agregación de las prioridades globales. La prioridad total nos permitirá realizar la síntesis del problema y seleccionar las más indicadas para conseguir el objetivo propuesto.
4. *Análisis de sensibilidad.* El resultado al que se llega en la etapa anterior es altamente dependiente de la jerarquía establecida por el decisor y por los juicios de valor que realiza sobre los diversos elementos del problema. Cambios en la jerarquía sobre estos juicios pueden conducir a cambios en los resultados.

InfoHarvest Inc. (2002) propone un procedimiento para realizar un AHP. El diagrama del proceso en general se muestra en la Figura 2-13. En este se excluyen las actividades intensivas en personas, tales como seleccionar el grupo de decisión, o reflexionar sobre la decisión. Las características de cada etapa se enuncia a continuación.

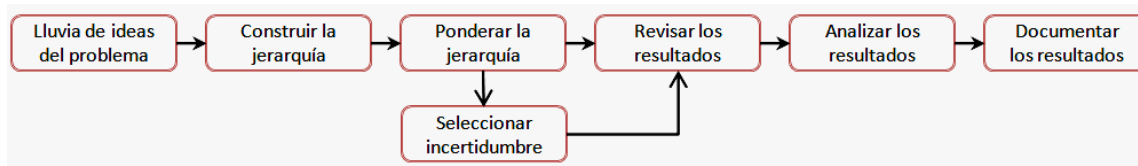


Figura 2-13. Diagrama del proceso AHP

Fuente: InfoHarvest Inc (2002)

- 1) Identificar los factores. Una vez que se conforme el grupo de decisión, la primera tarea es identificar todos los factores que deben considerarse en la decisión. La lluvia de ideas en esta etapa a menudo ayuda. Esta importante tarea consolida el grupo con un enfoque específico de toma de decisiones.
- 2) Desarrollar la estructura de decisión. Construir la jerarquía ayuda en la organización del problema y fuerza la disciplina en el proceso de toma de



decisiones. Completar este paso resulta en un claro entendimiento del problema de decisión. Los pasos en la generación lógica de la jerarquía son:

- ✍ Identificar la meta.
- ✍ Identificar factores o criterios importantes en el cumplimiento de la meta.
- ✍ Donde sea apropiado, identificar subcriterios debajo de cada criterio.
- ✍ A medida que la jerarquía se expande en subcriterios, el nivel de detalle o comprensión debería aumentar. El nivel más bajo está justo por encima del nivel de las alternativas. Este nivel más bajo de criterios/subcriterios deben representar un atributo de la alternativa que pueden ser evaluados objetivamente.

- 3) Evaluar la importancia de los criterios. Después de generar la jerarquía, se puede asignar valores a los criterios. Hay un número de maneras para hacer esto. Si los datos cuantitativos sobre los criterios están disponibles, se puede asignar directamente los valores numéricos contra un rango establecido para cada nivel en la jerarquía. Sin datos, se podría tener que comparar los criterios con un determinado nivel, lo que se conoce como comparación por pares. Cada criterio es subjetivamente comparado con los demás en el mismo nivel. En este momento, se puede determinar que ciertos criterios tienen poca importancia en la decisión y pueden ser reducidos desde una consideración adicional.
- 4) Evaluar Alternativas. Cada alternativa es ahora evaluada en relación con las de menor criterio. En este momento se puede decidir quitar o agregar alternativas.
- 5) Comprobar la razonabilidad. Una vez que determine los resultados iniciales, el grupo de decisión debería examinar las salidas y analizar los resultados. Esto puede ser tan simple como dar un paso atrás del problema y pensar en ello, a realizar lo que se conoce como análisis de sensibilidad. ¿La preocupación en este momento es la solidez de la decisión son los resultados? ¿Qué sucede si se



realizan cambios en los pesos? Si es necesario, se puede regresar a cualquier punto del proceso, hacer modificaciones, y volver a calcular los resultados. Al proceder de esta manera, se puede estar seguro de que la decisión es buena y se levanta para las auditorías de las partes interesadas.

- 6) Finalizar la Decisión. Una vez revisada la razonabilidad de los resultados cuidadosamente, el grupo de decisión se reúne para resolver las cuestiones pendientes y ultimar su decisión.
- 7) Documentar. La documentación de los resultados es un paso muy importante en el proceso. Los resultados deberían estar disponibles para su revisión por todos los clientes y partes interesadas. Además, la decisión está documentada en caso de ser necesario volver a examinar la decisión debido a cambios inesperados.

Existe software que facilita el proceso de toma de decisiones cuando diversos criterios se toman en cuenta en diferentes opciones, un caso es Criterium Decision Plus 3.0 (CDP). Este software incorpora dos técnicas de análisis de decisión: Proceso de Jerarquía Analítica (Analytical Hierarchy Process, AHP) y Técnica de Valuación de Multiatributos Simple (Simple Multiattribute Rating Technique, SMART). Cuando la decisión esté basada en evaluaciones puramente cualitativas y la introducción de una nueva alternativa o criterio puede generar grandes cambios en el modelo, el AHP es la técnica más adecuada. Sin embargo, si la mayoría de los datos disponibles es cuantitativo, y sobre todo si se conoce la incertidumbre en esos datos, SMART puede facilitar una mejor comprensión y un modelo de decisión más poderoso (InfoHarvest Inc, 2002).

La construcción de la red de jerarquía en CDP puede elaborarse de dos maneras. Si se utiliza una lluvia de ideas para iniciar el proceso de decisión, se puede construir automáticamente la jerarquía en el menú Modelo. Si ya se tiene el problema bien definido, se puede construir la estructura directamente en la sesión de Jerarquía.



CDP permite ingresar la valuación (peso) de cada criterio de dos maneras: numérico y oral. Cada opción tiene una escala correspondiente, pero se pueden crear nuevas escalas numérica y verbales (ver Figura 2-14).

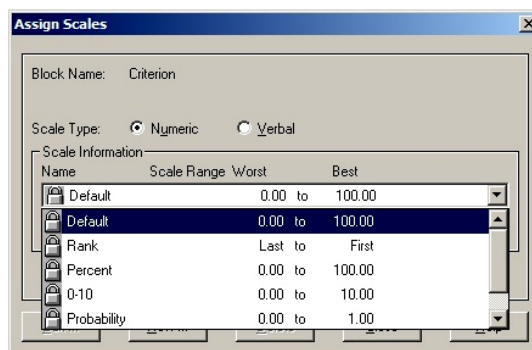


Figura 2-14. Escalas en CDP

Se pueden realizar comparaciones en pares completos por valuación de un criterio contra el otro dentro del conjunto de calificación o mediante una comparación por pares abreviada que sólo valúa un subconjunto de todos los pares.

El análisis de las contribuciones de los criterios pueden hacerse por cuatro tipos de gráficos: 1) gráficos de barras apiladas, 2) gráficos circulares, 3) gráficos de radar y 4) gráficos de tendencias. Cada tipo de gráfico revela diferentes aspectos de lo que está impulsando las puntuaciones de las alternativas de decisión (ver Figura 2-15).



Figura 2-15. Gráficas en CDP

Fuente: (InfoHarvest Inc, 2002).



El CDP permite realizar análisis de sensibilidad para determinar qué tan "sensible" es la decisión a los cambios en la importancia relativa asignada a los criterios. Cuando se realiza análisis de sensibilidad, CDP muestra una lista de pesos de los subcriterios con respecto a sus criterios padres con una métrica de la sensibilidad del resultado cuando se cambia el valor de ese peso. CDP da prioridad a la lista en orden de "más críticos" a menos "crítica". De este modo, puede centrarse en los criterios que pueden influir en la decisión de la mayoría.

2.5. La evaluación tecnológica.

El propósito de la evaluación tecnológica (ET) es proveer información competente e imparcial concerniente a los efectos físicos, biológicos, económicos, sociales, políticos y ambientales de la aplicación de la tecnología. Más específicamente, la meta de la ET es anticipar esos efectos, examinar un rango diverso de impactos, identificar los diferentes interesados quienes pueden ser afectados por la implementación de la tecnología y analizar los efectos de políticas alternativas (Shrader-Frechette, 1985; Dickey et al., 1973). Morgall (1993) indica que la ET se enfoca en identificar todos los posibles impactos de una nueva tecnología, no sólo los destinados. Esto incluye los efectos que no pueden ser medidos cuantitativamente, así como aquellos que pueden serlo.

La ET precede y coloca la base para un análisis de costo-beneficio. En algunos casos, la ET simplemente no se hace, resultando sistemas que son difíciles de integrar. Evaluar la necesidad de cualquier tecnología es una tarea compleja y orientada a detalles que requiere un análisis minucioso de requerimientos técnicos, factores de organización interna y consideraciones ambientales externas (Gupta y Lewis, 1993). Generalmente la ET/EIA pueden tomar una de las siguientes formas: a) evaluación de proyectos; b) evaluación de problema orientado; c) evaluación de tecnología aplicada (Shrader-Frechette, 1985).



La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), un subconjunto de la ET, es el estudio sistemático de las consecuencias relacionadas con el ambiente de la implementación de un proyecto particular o tecnología. Las similitudes y diferencias entre la ET y la EIA se exponen en la Tabla 2-23.

Tabla 2-23 diferencias entre la ET y la EIA

Similitudes	Diferencias
• Ambos están destinados a anticipar las consecuencias futuras así como efectos inmediatos, y están enfocadas a cuestiones relacionadas con la tecnología. • En principio (pensado a menudo no en la práctica) consideran los pros y contra de políticas alternativas y de proyectos. • Son altamente variables en escala; pueden variar (en términos de trabajo necesario para completar la evaluación) de varios meses-persona a empresas que requieren el esfuerzo de muchas personas durante varios años.	• La ET sea generalmente más amplia en alcance que el EIA. • ET tiende a tener un foco internacional o nacional, mientras que el EIA se ocupa a menudo de consideraciones regionales puramente locales; la ET es con frecuencia más de orientación política que el EIA. • Quizás la diferencia más grande entre los dos tipos de evaluación es hecha respecto al horizonte de tiempo. La ET en principio se piensa para tratar opciones políticas inmediatas y de largo plazo, pero el EIA se ocupa generalmente de tecnologías o de proyectos ambientales cerca del punto de terminación.

Fuente: Shrader-Frechette (1985)

La ET es un primer paso crítico y esencial en el desarrollo de un sistema confiable y robusto. Un análisis preliminar determinará lo adecuado de una tecnología para un problema dado e identificar los factores críticos de éxito. Si la investigación preliminar indica que el sistema puede ser apropiado para el problema actual, sólo entonces se recomendaría otro análisis, tal como el análisis de costo-beneficio (Gupta y Lewis, 1993).

Quintanilla (1999) propuso una metodología de dos fases para el desarrollo un Sistema de Evaluación Tecnológica (SET). En la primera fase – denominada fase analítica- mediante entrevistas a actores clave y la aplicación de cuestionarios a los habitantes de las comunidades bajo estudio, se recolecta información que posee un gran potencial para revelar la complejidad del sistema. En la segunda fase –o fase cuantitativa- se realiza una evaluación *in situ* de los recursos bajo análisis y se analizan las tecnologías potenciales. Sobre los resultados obtenidos se realiza la propuesta tecnológica más aceptable.

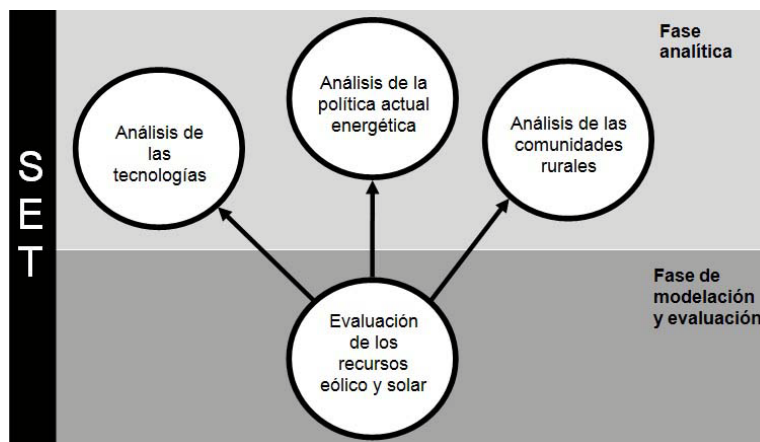


Figura 2-16. Metodología para un SET de energías alternas (solar y eólico)

Fuente: Quintanilla (1999)

Shrader-Frechette (1985) provee una lista de diez pasos a ser considerados por los equipos de evaluación. Esta se expone en la Tabla 2-24.

Tabla 2-24 Evaluación tecnológica propuesta por Shrader-Frechette

Etapa	Descripción
Definición del problema	Define el alcance y profundidad de la evaluación e identifica los "partidos de interés" del proyecto –aquellas personas probables a ganar o perder como resultado de especial impacto.
Descripción de la tecnología	Descripción de la tecnología que está siendo evaluada.
Pronóstico de la tecnología	Los asesores intentan anticipar el carácter y calendario de cambio en las tecnologías y otros relacionados con ella. El propósito de este componente del estudio es revelar factores tales como el probable ahorro de costos futuros, nuevas aplicaciones de tecnología y posibles avances científicos futuros.
Descripción social	Se intenta describir aquellos aspectos de la sociedad (condiciones económicas, clima político, regulaciones gubernamentales) probables a interactuar con la tecnología bajo consideración. Diversos indicadores sociales y cuestionarios son útiles en esta etapa.
Pronóstico social	Sobre la descripción social, se representa de la manera más verosímil futuras configuraciones de la sociedad y proyectar posibles cambios en ella.
Identificación de impactos	Identificar impactos directos y de alto orden del proyecto propuesto o tecnología.
Análisis de impacto	Los equipos interdisciplinarios estudian las probabilidades y magnitudes de varios impactos identificados durante el trabajo en el componente previo de evaluación. Aquí la experiencia esencial de las disciplinas particulares juega un gran rol.
Evaluación de impacto	Se emplean los análisis para evaluar los impactos y determinar su significancia relativa a la tecnología y las metas sociales.
Análisis de políticas	Se comparan las opciones para implementar desarrollos tecnológicos y para trata con sus consecuencias. Sobre la base de estos análisis, recomendaciones políticas explícitas pueden o no ser hechas.
Comunicación de resultados	El equipo determina las formas en la que los resultados del estudio deben ser comunicados a las personas o grupos más probables a beneficiarse de ello.

Fuente: Shrader-Frechette (1985)



Dickey et al. (1973) proponen una metodología de seis pasos para la evaluación tecnológica (ver Figura 2-17). En el primer paso se define el dominio del problema y el sistema completo afectado. La descripción de las tecnologías relevantes (paso 2) es organizada para cada una de las seis etapas del sistema. Esto provee una lista de compra de tecnologías alternativas. La descripción del estado existente (paso 3) incluye una estimación de valores de las afectaciones individuales y afectados por el sistema, así como las consecuencias internas y externas de los sistemas existentes. La formulación de objetivos alternos (paso 4) se basa en la magnitud de los problemas internos y externos y en los valores deducidos por los tomadores de decisiones y sus mandantes. Para cada conjunto de objetivos específicos, una opción de acción única es identificada por la puesta junto a un conjunto de alternativas de estado, las cuales son consistentes y compatibles y que satisfacen al conjunto de objetivos en la medida de lo posible (paso 5). El paso final en la evaluación (paso 6) es describir los impactos directos e indirectos (consecuencias) de cada opción de acción.

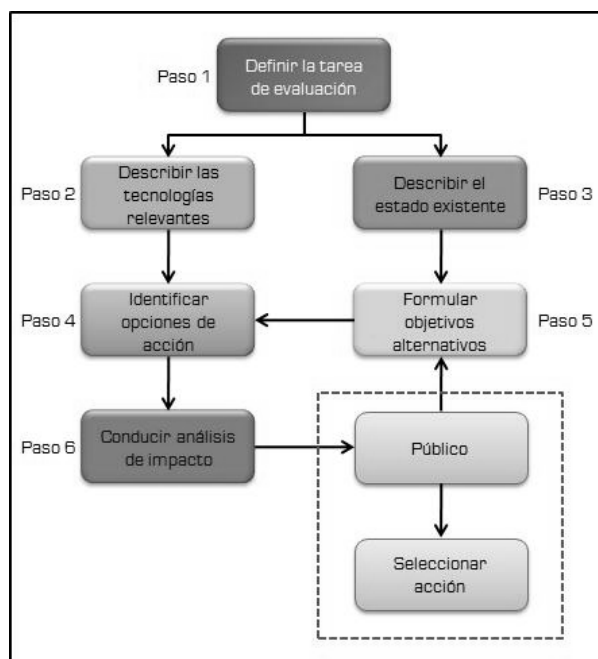


Figura 2-17. Seis pasos principales en la evaluación tecnológica.

Fuente: Dickey et al, 1973



Gupta y Lewis (1993) proponen una ET en dos etapas. En el primer nivel se realiza un cribado preliminar de la información cuyo objetivo es disuadir a los encargados de adoptar decisiones de sucumbir a la tentación de forzar un problema para adaptarse a una tecnología determinada en lugar de la tecnología para el problema. En el segundo nivel se combinan factores de importancia con las consideraciones tecnológicas para una evaluación más detallada.

Sobre los criterios que deben ser considerados en la evaluación de sistemas de tecnologías, Quintanilla (1999) menciona que los siguientes siete criterios debieran ser utilizados para países en desarrollo.

1. Generación de empleos.
2. Ahorro de capital.
3. Conservación y eficiencia de energía.
4. Seguridad ambiental
5. Sociocultural y económicamente apropiada:
 - a. Compatibilidad con los gustos y las culturas locales.
 - b. Diseñado para incluir el contexto específico de las necesidades y las restricciones.
 - c. Compatible con el poder adquisitivo local.
 - d. Utilización de materiales locales.
6. Involucramiento y participación de las mujeres.
7. Consistencia con otras actividades en términos del sistema.

2.6. El proceso cualitativo

La problemática de los residuos sólidos no puede abordarse desde una perspectiva cuantitativa (positivista) solamente. Existen aspectos que sólo pueden comprenderse analizándolos bajo estudios cualitativos, ejemplo de ello es la etapa de generación. El creciente



aumento en la cantidad de residuos generados obedece a un comportamiento social, el cual es afectado por aspectos educativos, económicos, políticos y geográficos. Por otra parte, la gestión de los residuos no se está desarrollando adecuadamente; existen impedimentos que en ocasiones no corresponden a aspectos económicos o técnicos, sino a aspectos políticos, organizacionales, personales o de conocimiento de los tomadores de decisiones, todos ellos de carácter cualitativo.

La investigación cualitativa es el procedimiento metodológico que utiliza palabras, textos, discursos, dibujos, gráficos e imágenes para analizar la vida social por medio de significados y desde una perspectiva holística, pues se trata de entender el conjunto de cualidades interrelacionadas que caracterizan a un determinado fenómeno (Mejía, 2004). De acuerdo a Hernández et al. (2008), el propósito de un análisis cualitativo es obtener datos para tratar de comprender y/o explicar hechos. Mediante este tipo de estudios se puede:

- ✍ Describir experiencias de las personas relacionadas al objeto de estudio.
- ✍ Comprender el contexto que rodea a los datos.
- ✍ Interpretar y evaluar unidades, categorías, temas y patrones.
- ✍ Explicar ambientes, situaciones, hechos y fenómenos.
- ✍ Encontrar sentido a los datos.
- ✍ Relacionar los resultados del análisis con la teoría fundamentada.
- ✍ Construir teorías.
- ✍ Responder a las preguntas de investigación y generar conocimiento.

El conocimiento que se obtiene mediante la investigación cualitativa no es una relación estadística, ni la medición repetida de variables hasta encontrar su correlación y covarianza para luego generalizar la inferencia como una proposición universal (Flórez y Tobón, 2001).



El proceso cualitativo no es lineal ni lleva una secuencia como el proceso cuantitativo. Las etapas son iterativas y recurrentes; muestreo, recolección y análisis resultan actividades casi paralelas (Hernández et al., 2008).

2.6.1. La recolección de datos

El instrumento de recolección de datos en el proceso cualitativo es el investigador. En la indagación cualitativa el instrumento no es una prueba estandarizada ni un cuestionario ni un sistema de medición; es el mismo investigador, que constituye también una fuente de datos. Éste es el medio de obtención de los datos (Hernández et al., 2008; Flórez y Tobón, 2001).

Hernández et al. (2008) expresan que la recolección de datos ocurre en ambientes naturales y cotidianos de los participantes o unidades de análisis. Las unidades de análisis que pueden incluirse en el proceso cualitativo son:

- *Significados*. Empleados para aludir a la vida social como definiciones, ideologías o estereotipos.
- *Prácticas*. Se refiere a una actividad rutinaria de un sistema social.
- *Episodios*. Son sucesos dramáticos sobresalientes.
- *Encuentros*. Se da entre dos o más personas de manera presencial.
- *Papeles*. Sirve para que la gente se organice y proporcione sentido o significado a sus prácticas.
- *Relaciones*. Constituyen diádas que interactúan por periodos largos.
- *Grupos*. Conjunto de personas que interactúan por un periodo extendido.
- *Organizaciones*. Unidades formadas con fines colectivos.
- *Comunidades*. Asentamientos humanos donde surgen organizaciones, grupos, etc.



- *Estilos de vida.* Conductas que realiza un gran número de personas en una situación similar.

2.6.1.1. Entrevistas

La entrevista cualitativa se define como una reunión para intercambiar información entre una persona (el entrevistador) y otra (el entrevistado) u otras (entrevistados). A través de las preguntas y respuestas, se logra una comunicación y la construcción conjunta de significados respecto a un tema. Mediante la entrevista obtenemos información que no conseguimos con la observación, por tanto es complementaria (Hernández et al., 2008; Flórez y Tobón, 2001).

Las entrevistas se dividen en estructuradas, semi-estructuradas o no estructuradas o abiertas. Las primeras se basan en una guía de preguntas específicas y el entrevistador se sujeta a ellas. En las semi-estructuradas, existen preguntas guías pero el entrevistador puede introducir preguntas adicionales para obtener mayor información. Las abiertas se fundamentan en una guía general y el entrevistador está libre para manejar la entrevista.

Regularmente en la investigación cualitativa, las primeras entrevistas son abiertas y de tipo “piloto”. Las entrevistas deben ser abiertas, sin categorías preestablecidas, de tal forma que los participantes expresen sus experiencias sin ser influidos por la perspectiva del investigador. Conforme avanza el trabajo de campo se pueden estructurar, pero no es lo usual que sean estructuradas (Hernández et al., 2008). Flórez y Tobón (2001) exponen las siguientes recomendaciones que deben adoptarse en el transcurso de las entrevistas exploratorias.

- Vigilar que la entrevista se realice en un ambiente adecuado que ofrezca el mínimo de interrupciones y plantear el menor número de preguntas posibles cuando se trata de entrevistas focalizadas.



- Ser flexibles en la utilización de la pauta. Esto puede referirse al orden y a la importancia y extensión dada a los puntos que ella contiene.
- Limitar los comentarios y las propias intervenciones para no introducirlos en el contenido de la entrevista, sobre todo no participando en debates de ideas.
- Intervenir de manera activa pero dejando que el entrevistado exprese su propia realidad, en su propio lenguaje y sus propios marcos de referencia.
- Entrenarse en recoger el texto por escrito para no tener que estar dependiendo siempre de grabadoras, las cuales deben reservarse para fases posteriores de la investigación.

La entrevista, como etapa de un proceso de investigación, finaliza cuando se ha recogido y descrito un buen conjunto de material protocolar (primario). Esto sucede cuando las grabaciones y anotaciones se consideran suficientes para emprender una sólida categorización o clasificación que, a su vez, pueda nutrir un buen análisis, interpretación y teorización y conducir a resultados valiosos (Martínez, 1999).

2.6.1.2. La muestra

No existen reglas para el tamaño de muestra en investigaciones cualitativas. La muestra se define en cualquier momento y no hay una etapa específica en la cual se elabore tal definición. En la indagación cualitativa el tamaño de muestra no se fija a priori. El tamaño de la muestra depende de lo que se desee encontrar, por qué se quiere encontrar, cómo lo encontrado puede ser usado y qué recursos (incluye tiempo) se tienen para el estudio. La muestra final se conoce cuando los casos que van adicionándose no aportan información o datos novedosos; conocido como “saturación de categorías” (Hernández et al., 2008; Patton, 2001).

Hernández et al. (2008) expresan que en los estudios cualitativos el tamaño de muestra no es importante desde una perspectiva probabilística, pues el interés no es generalizar. Lo que se



busca en la indagación cualitativa es profundidad, se pretende calidad más que cantidad. Las muestras grandes en la práctica son inmanejables por la complejidad al documentar de manera exhaustiva. Por lo general son tres los factores que intervienen para “determinar” (sugerir) el número de casos:

- Capacidad operativa de recolección de análisis (número de casos vs. Recursos);
- El entendimiento del fenómeno (número de casos que nos permitan comprender la problemática);
- La naturaleza del fenómeno bajo análisis (si los casos son frecuentes, tiempo de recolección de datos, u otros).

La decisión del número de unidades que conformen la muestra es del investigador, así como de los tres factores intervinientes que se mencionan. Las muestras cualitativas no deben ser utilizadas para representar una población. En una investigación cualitativa la muestra puede contener cierto tipo definido de unidades iniciales, pero conforme se avanza el estudio se pueden ir agregando otros tipos de unidades y aun desechar las primeras unidades. También se pueden tener unidades cuya naturaleza sea diferente. En la indagación inductiva, la muestra se va evaluando y redefiniendo permanentemente (Hernández et al., 2008).

2.6.2. Análisis de datos cualitativos

El análisis de los datos no es predeterminado, sino que es “prefigurado, coreografiado o esbozado”. Es decir, se comienza a efectuar bajo un plan general, pero su desarrollo va sufriendo modificaciones de acuerdo con los resultados. En el análisis cualitativo la recolección y el análisis ocurren prácticamente en paralelo. Además, el análisis no es estándar, ya que cada estudio requiere de un esquema propio de análisis. Estandarizar iría en contra de la lógica inductiva (Hernández et al., 2008).



Los datos recabados consisten en datos no estructurados y su presentación es muy variada, pudiendo ser videos, entrevistas, textos, expresiones y anotaciones de la bitácora de campo. No obstante, a estos datos se les da una estructura.

La categorización, el análisis y la interpretación de los contenidos no son actividades mentales separables, sin embargo constituyen actividades mentales diferentes. La categorización exige el análisis del material y la reflexión sobre la información para comprender lo que pasa. En esta etapa se trata de categorizar o clasificar las partes en relación con el todo, de describir categorías o clases significativas, de ir constantemente diseñando y rediseñando, integrando y reintegrando el todo y las partes, a medida que se revisa el material y va emergiendo el significado de cada sector, evento, hecho o dato (Flick, 2004; Martínez, 1999).

Martínez (1999) expone que la categorización tiene la finalidad de resumir el contenido de la entrevista en pocas ideas o conceptos más fáciles de manejar y de relacionar:

1. Transcribir detalladamente los contenidos de información protocolar en los dos tercios derechos de las páginas, numerando las páginas y las líneas para facilitar después las referencias.
2. Releer la entrevista subrayando las palabras más relevantes y significativas (ver Figura 2-18).
3. Dividir el contenido en unidades temáticas (párrafos que expresen una idea o concepto central).
4. Categorizar con un término o expresión el contenido de cada unidad temática. Este término se escribe en el tercio izquierdo de la página. Cada investigador tiene que elaborar su propia lista, que contendrá el mayor número posible de categorías descriptivas.



Categorización	Texto	Pág. 1
	(1) Alumno de 2o. año de secundaria: 14 años (bajo rendimiento)	
+ Situación de los estudiantes:	1 Alumno. Como le decía antes, a ese profesor (de matemáticas) casi	
• No aprenden.	2 <u>nadie le entiende</u> . Habla bajito y volteado hacia el pizarrón, cuando	
+ Didáctica:	3 escribe. Casi no se le oye. Además, cuando él explica, muchos	
• Inadecuada	4 alumnos están hablando. Total que, aunque uno quiera seguirlo, no	
• Términos inadecuados	5 puede, porque no le oye. Otra cosa que es hasta cómica: a él le gusta	
	6 decir palabras rimbombantes y hasta pedantes. El otro día "la agarró"	
	7 con "parámetro" y "paramétrico" y cuando Juan (un compañero mío) le	
	8 preguntó qué era eso, enredó más las cosas, pues para explicar lo que	
	9 quería decir con esas palabras usó otras peores todavía.	
	10 Investigador. ¿Qué palabras usó?	
	11 A. Bueno, recuerdo que una era algo así como "parábola" o "medida	
	12 parabólica". Y resulta que no tenía nada que ver con las parábolas del	
	13 Evangelio. Eran otras parábolas; no sé, de geometría. También hablaba	
	14 de "indeterminadas"; que si determinan o no determinan. Total que	
	15 es un "rollo" entenderle. ¡Ay... y dígame eso de las <u>inecuaciones!</u>	
	16 I. ¿Y ustedes, no le piden que explique más claro?	
+ Autoconcepto del profesor:	17 A. ¡Ah, no! Él está convencido que explica clarísimo. Los brutos	
• Erróneo	18 <u>somos nosotros</u> , que no entendemos; y nos lo dice a cada momento,	
	19 sobre todo cuando reparte los trabajos y exámenes y la mayoría resultamos	
+ Concepto de los alumnos:	20 aplazados (reprobados). Es más, si uno le pide que explique algo, así, bien...	
• Erróneo	21 ¡Bueno... pase! Pero si a uno se le escapa una <u>palabra que parezca</u>	
	22 <u>decir que él explica mal o que es mal profesor</u> ... ¡bueno!, la que se	
+ Observaciones personales:	23 arma es gorda. Y lo mismo sucede cuando <u>alguien sugiere alguna idea</u>	
• No se aceptan	24 <u>o alguna solución que él no tenga en su cabeza</u> ...	
+ Concepto de los alumnos:	25 I. ¿Qué pasa en esos momentos?	
• Subvaloración	26 A. Bueno, él no cree que de nuestras cabezas pueda salir algo	
	27 <u>bueno</u> . Todo lo que a nosotros se nos ocurra son puras tonterías y	
	28 puras estupideces. Y fíjese que el otro día, en un enredo que tenía con	
	29 lo de los vectores y las fuerzas, que si la dirección, que si el sentido,	

Figura 2-18. Categorización de información.

Fuente: Martínez (1999)

- Si hay categorías que se repiten y alguna tiene propiedades o atributos diferentes, asignarle una subcategoría, que puede referirse a alguna dimensión, atributo, propiedad, condición o consecuencia importante. Habrá también categorías que se podrán integrar o agrupar en una categoría más amplia y comprehensiva.
- Se agrupan o asocian las categorías de acuerdo con su naturaleza y contenido. Los procedimientos prácticos que se van a usar, en este punto, dependen mucho de la imaginación y capacidad de cada investigador (ver Figura 2-19).
- Si los datos y las categorías lo aconsejan, un despliegue de los mismos por medio de una matriz revelará muchas relaciones.
- El siguiente paso introduce en la teorización. En este paso se percibe, contrasta, compara, agrega y ordena categorías o grupos de categorías y sus propiedades, establece nexos, enlaces o relaciones y especula (ver Figura 2-20).

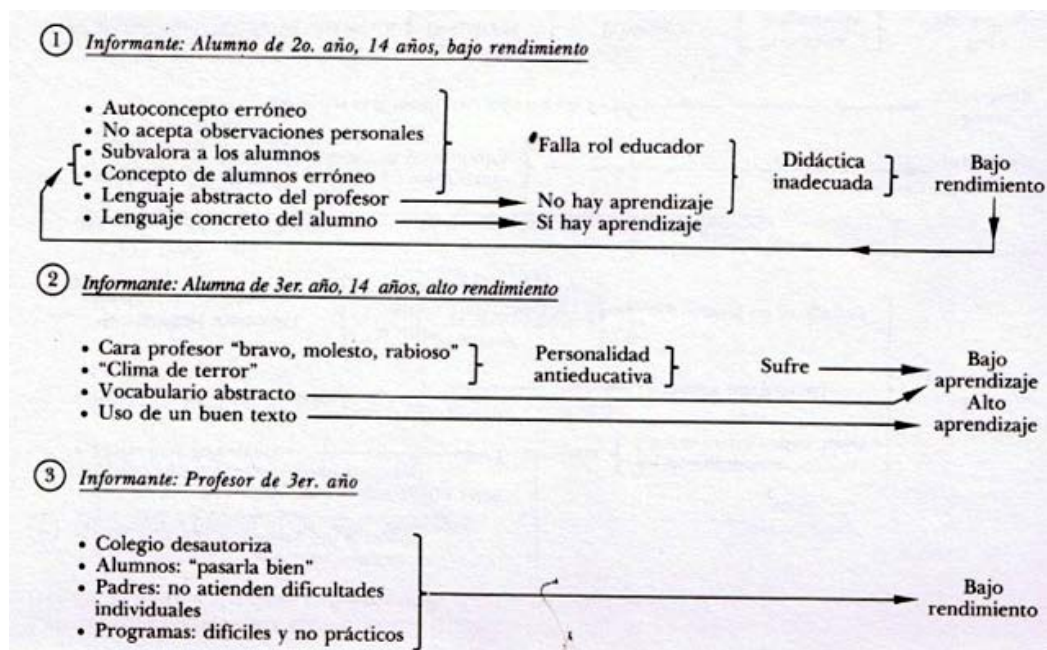


Figura 2-19. Estructuración de información.

Fuente: Martínez (1999)

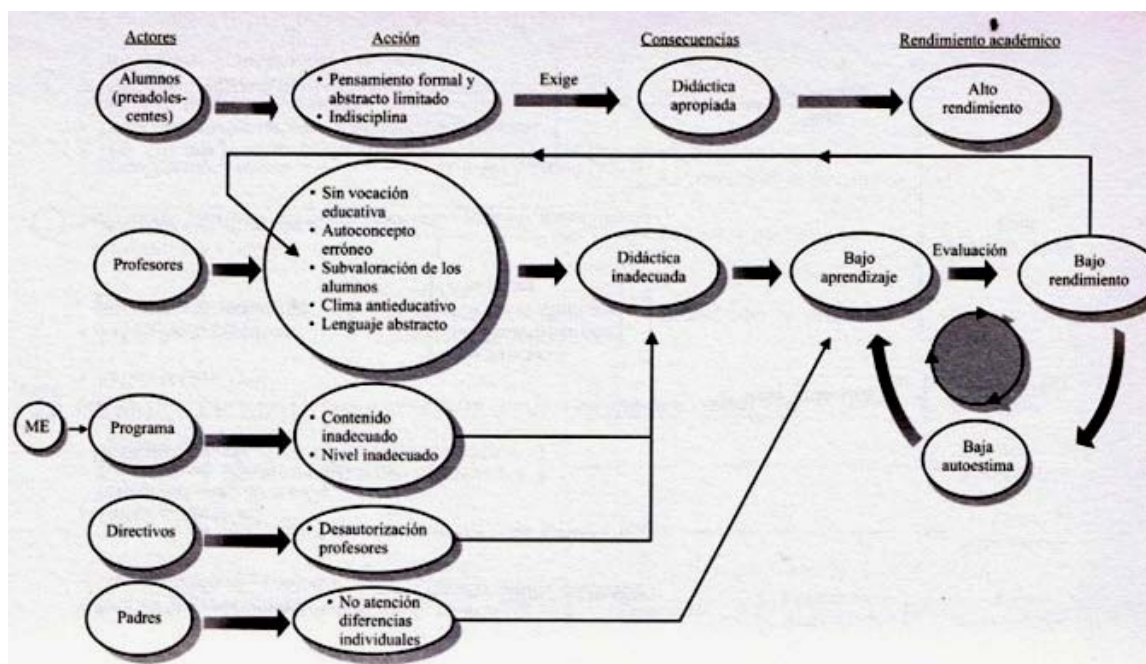


Figura 2-20. Teorización de información.

Fuente: Martínez (1999)



2.6.3. La evaluación de los estudios cualitativos

Los cánones o estándares cuantitativos son inapropiados para evaluar el rigor metodológico de los estudios cualitativos. Los abordajes cualitativo y cuantitativo tienen diferentes raíces ontológicas y epistemológicas que deben comprenderse, respetarse y mantenerse durante el proceso investigativo. Los cánones o estándares usuales en la investigación cuantitativa incluyen dos elementos: la validez y la confiabilidad. Extrapolar estos criterios a la investigación cualitativa es contraproducente pues se violan los propósitos, los objetivos y la integridad del abordaje cualitativo (Castillo y Vásquez, 2003).

La investigación cualitativa se caracteriza por ver las cosas desde el punto de vista de las personas que están siendo estudiadas. Según Hernández et al. (2008), la interpretación que se haga de los datos diferirá de la que podrían realizar otros investigadores; lo cual no significa que una interpretación sea mejor que otra, sino que cada quien posee su propia perspectiva. Patton (2001) expone que no existe una forma definitiva para categorizar las diversas perspectivas filosóficas y teóricas que han influenciado y distinguen los tipos de investigación cualitativa.

En la investigación mediante métodos cualitativos, la confiabilidad y validez son reemplazados por criterios de credibilidad, transferibilidad, dependencia, coherencia y confirmabilidad (Tarrés, 2001). Castillo y Vásquez (2003) exponen que los criterios que comúnmente se utilizan para evaluar la calidad científica de un estudio cualitativo son la credibilidad, la auditabilidad y la transferibilidad.

2.6.3.1. Validez cualitativa

Martínez (2006) expone la validez se refiere a la capacidad de verificar si en realidad medimos lo que nos proponemos medir. En sentido amplio y general, una investigación tendrá un



alto nivel de “validez” en la medida en que sus resultados “reflejen” una imagen lo más completa posible, clara y representativa de la realidad o situación estudiada y no sólo un aspecto o parte de la misma. Castillo y Vásquez (2003) enuncian que la validez –manejada por ellas como credibilidad- se refiere a cómo los resultados de una investigación son verdaderos para las personas que fueron estudiadas y para otras personas que han experimentado o estado en contacto con el fenómeno investigado.

Martínez (2006) expone que en cuanto a la validez es necesario recordar que a menudo las estructuras de significado descubiertas en un grupo no son comparables con las de otro, porque son específicas y propias de ese grupo, en esa situación y en esas circunstancias, o porque el segundo grupo ha sido mal escogido y no le son aplicables las conclusiones obtenidas en el primero. Hernández et al. (2008) expresan que la impresión que perciba el investigador depende del contexto y esto le da una interpretación que es única. Castillo y Vásquez (2003) señalan que el criterio de validez se puede alcanzar porque generalmente los investigadores, para confirmar los hallazgos y revisar algunos datos particulares, vuelven a los informantes durante la recolección de la información.

2.6.3.2. Confiabilidad cualitativa

La confiabilidad es el grado en que diferentes investigadores que recolecten datos similares en el campo y efectúen los mismos análisis, generen resultados equivalentes (Hernández et al., 2008; Castillo y Vásquez, 2003). Martínez (2006) por su parte explica que el concepto tradicional de “confiabilidad” externa implica que un estudio se puede repetir con el mismo método sin alterar los resultados, es decir, es una medida de lo replicable de los resultados de la investigación.



Castillo y Vásquez (2003) expresan que para lograr la confiabilidad –llamada por ellas auditabilidad- es necesario un registro y documentación completa de las decisiones e ideas que el investigador haya tenido en relación con el estudio. Esta estrategia permite que otro investigador examine los datos y pueda llegar a conclusiones iguales o similares a las del investigador original siempre y cuando tengan perspectivas similares.

La *confiabilidad* ha representado siempre un requisito difícil para las investigaciones cualitativas, debido a la naturaleza -imposibilidad de repetir, *stricto sensu*, el *mismo* estudio- peculiar de éstas (Martínez, 2006; Castillo y Vásquez, 2003). En las ciencias humanas es prácticamente imposible reproducir las condiciones exactas en que “un comportamiento” y su estudio tuvieron lugar. Hernández et al. (2008) concuerdan con esto al expresar que cada situación es diferente: hay temas donde un perfil es mejor que otro (sexo, edad, religión, nivel socioeconómico), el clima de confianza con el entrevistado, entre otros.

Con el objeto de alcanzar un buen nivel de confiabilidad, Martínez (2006) aconseja recurrir, entre otras, a las siguientes estrategias:

- Precisar el *nivel de participación* y la posición asumida por el investigador en el grupo estudiado; cierta información puede ser diferente de acuerdo con el sexo de quien la dé (las mujeres pueden ocultar ciertos datos íntimos si el investigador, por ejemplo, es de sexo masculino); igual sucede si el investigador ha hecho amigos dentro del grupo; éstos le darán informaciones que no les dan otros.
- *Identificar claramente a los informantes*. Éstos pueden representar grupos definidos y dar información parcial o prejuiciada. Los miembros que simpatizan y colaboran más con los investigadores pueden ser, por esto mismo, miembros atípicos. Esta situación se puede advertir al hacer una buena descripción del tipo de personas que han servido como informantes.



- Un tercer elemento que puede influir en los datos es el *contexto* en que se recogen. Debido a ello, conviene especificar el contexto físico, social e interpersonal de que se derivan. Esto aumentará la replicabilidad de los estudios.
- Para que sea posible una “cierta réplica” es imprescindible la identificación de los *supuestos* y *metateorías* que subyacen en la elección de la terminología y los métodos de análisis. Los conceptos de "cultura", "ciencia", "método", "análisis", "dato", "codificación" y muchos otros pueden diferir sustancialmente entre diferentes investigadores.
- Precisar los *métodos de recolección de la información* y de su análisis, de tal manera que otros investigadores puedan servirse del reporte original como un manual de operación para repetir el estudio. La replicabilidad se vuelve imposible sin una precisa identificación y cuidadosa descripción de las estrategias de procedimiento.

2.6.3.3. Triangulación

En la indagación cualitativa poseemos una mayor riqueza y profundidad en los datos si éstos provienen de diferentes actores del proceso, de distintas fuentes y al utilizar una mayor variedad de formas de recolección de datos. A este hecho se le denomina “triangulación” (Hernández et al., 2008). La metáfora subyacente a la triangulación proviene de los estudios marítimos y de estrategia militar, por la que la utilización de distintos puntos de referencia permite localizar la posición exacta de un objeto (Rodríguez, 1999).

Bryman (2002) expone que la triangulación se refiere a la utilización de más de un enfoque para la investigación de una pregunta de investigación con el fin de reforzar la confianza en los resultados consiguientes. Dado que gran parte de la investigación social se basa en la utilización de un único método de investigación y, como tales, pueden sufrir limitaciones asociadas con este



método o de la aplicación específica de la misma, la triangulación ofrece la perspectiva de una mayor confianza.

Rodríguez (1999) expone que una fortaleza central de la triangulación metodológica es que permite a los evaluadores tener más confianza en los resultados alcanzados. Si los distintos acercamientos coinciden o llegan a las mismas conclusiones, se ha fortalecido la validez de las interpretaciones, vía una comprensión mayor de la realidad en estudio. Este punto requiere cierta reflexión metodológica para no obviar que la fuente de error puede estar atacando a las distintas fuentes de información por igual.

La idea de triangulación convencional más allá de su asociación con los métodos de investigación y los diseños (Fitzpatrick et al., 2006; Bryman, 2002; Rodríguez, 1999). Se distinguen cuatro formas de triangulación:

- La triangulación de datos, lo que implica la recopilación de datos a través de varias estrategias de muestreo, a fin de que fragmentos de datos en diferentes momentos y situaciones sociales, así como sobre una variedad de personas, se reúnan.
- La triangulación de investigadores se refiere a la utilización de más de un investigador en el campo para recopilar e interpretar datos. El abordaje de una realidad o proyecto a evaluar desde las miradas múltiples de distintos observadores, aporta a la confiabilidad de los hallazgos al permitir que distintas miradas den cuenta del mismo objeto.
- La triangulación teórica se refiere a la utilización de más de una posición teórica en la interpretación de los datos.
- La triangulación metodológica se refiere a la utilización de más de un método de recogida de datos. Parte del supuesto básico que las debilidades de cada método



individual han de ser compensadas por la fortaleza contra balanceadora de otro método.

2.6.3.4. Transferibilidad

Se refiere a la posibilidad de extender los resultados del estudio a otras poblaciones. Para ello se necesita que se describa el lugar y las características de las personas donde el fenómeno fue estudiado. Por tanto, el grado de transferibilidad (o aplicabilidad) es una función directa de la similitud entre los contextos (Castillo y Vásquez, 2003).

Los resultados de la investigación cualitativa no son fácilmente transferibles o generalizables, ya que cada investigación se basa en situaciones particulares y específicas o en contextos dados. No obstante, la utilización de estrategias como la “descripción densa” o la “recogida de información abundante” permiten un grado suficiente de transferencia de los resultados (Medina et al., 2006; Tarrés, 2001; Carrasco y Hernández, 2000):

- a) La descripción densa consiste en realizar descripciones de modo minucioso y exhaustivo con el fin de poder comparar y ver las posibles correspondencias existentes entre unos contextos y otros que permitan generalizar las conclusiones.
- b) La recogida de información abundante consiste en hacer acopio de toda la información posible que permita establecer correspondencia entre el contexto investigado y otros similares.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el proceso metodológico realizado para determinar la tecnología *ad hoc* para el tratamiento de residuos sólidos en las comunidades rurales de San Quintín y Vicente Guerrero, localizadas en Ensenada, Baja California, México. La investigación se abordó desde perspectivas cualitativas y cuantitativas, e incluyó estudios de composición y generación de residuos, entrevistas a la comunidad y entrevistas con actores clave a nivel municipal y estatal. Los resultado se integraron a una jerarquía para su evaluación con el método AHP.

3.1. Desarrollo del estudio

El primer paso fue construir un bosquejo del estudio. Se inició definiendo los posibles criterios que intervienen en la puesta en marcha de una tecnología. La información de estos elementos se integra por una herramienta de análisis y un elemento gráfico. El resultado es la propuesta de una tecnología (ver Figura 3-1).

Un análisis bibliográfico reveló a los aspectos ambientales, económicos, sociales y políticos como los criterios necesarios a evaluar para la selección de una tecnología de tratamiento (que en la jerarquía del AHP es el objetivo principal o meta). Estos criterios fueron considerados clave por otros autores (Bell y Morse, 2003; Seo et al., 2003; Quintanilla, 1999; Shrader-Frechette, 1985; Wad y Radnor, 1984; Dickey et al., 1973).

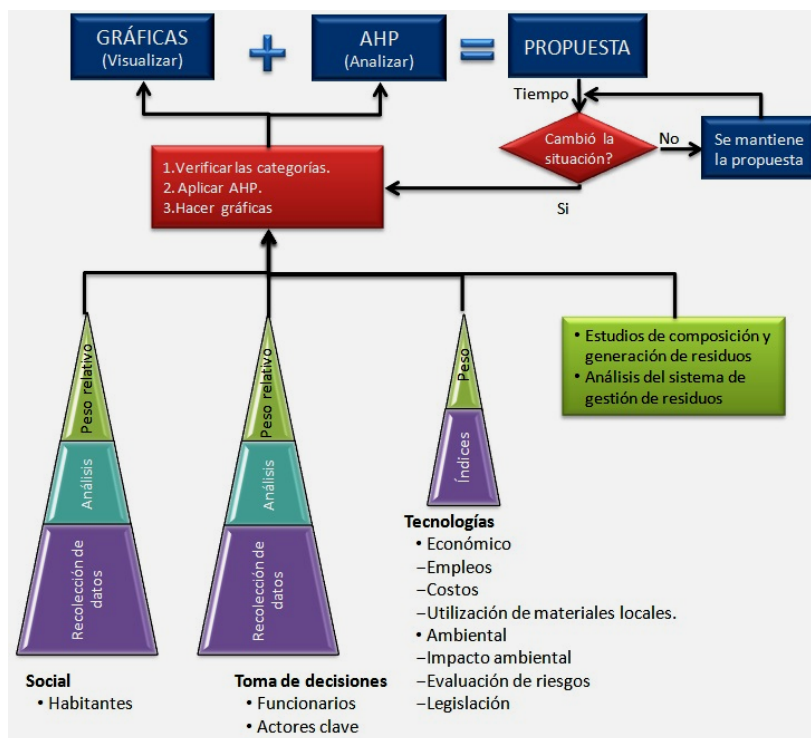


Figura 3-1. Procedimiento general del estudio

Considerando que la información que se obtendría sería cualitativa y cuantitativa, se buscó en la literatura un método de evaluación que pudiera trabajar con los dos tipos de información. El análisis mostró que el AHP es el método más adecuado de acuerdo a las necesidades del estudio. Se pensó en la inclusión de un gráfico en el proceso para ilustrar la situación prevaleciente al momento de la evaluación y facilitar la detección de cambios en el futuro. Inicialmente se consideró el diagrama AMOEBA, pero la información necesaria para construir este tipo de gráficos (índices) es muy escasa por razones comerciales. Por ello, se consideró emplear otro tipo de gráfico, como el análisis de sensibilidad, para ayudar a los tomadores de decisiones.

Para asegurar la selección de la tecnología sobre el tiempo, se determinó incluir un lazo de retroalimentación. Si las condiciones en alguno de los criterios cambian, se sugiere hacer una revisión de los criterios y una nueva evaluación con el AHP.

Una vez que definido el proceso general, se desarrolló un procedimiento detallado (ver Figura 3-2) donde se indicaron las actividades que se tendrían que realizar para obtener la información necesaria para la evaluación. La caracterización de residuos y el análisis de tecnologías se consideraron en la fase cuantitativa, mientras que la percepción de la sociedad, de los tomadores de decisiones y actores clave, se consideraron en la fase cualitativa.

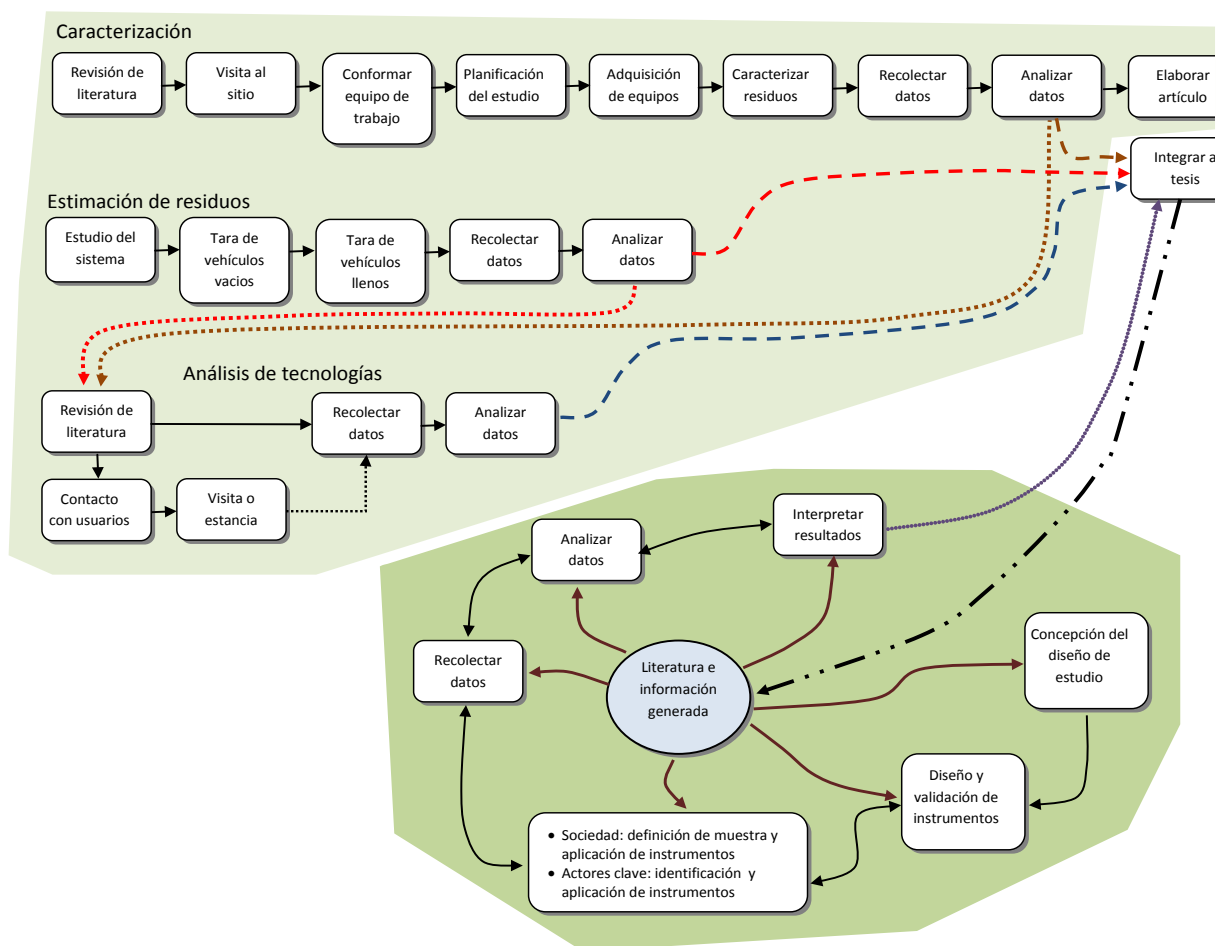


Figura 3-2. Procedimiento detallado del estudio

3.2. Estudio de composición y generación de RS

3.2.1. Planificación del estudio

Un mes antes del primer estudio se inició la logística de la caracterización:



- Se realizó una visita a los vertederos de San Quintín y Vicente Guerrero para recolectar evidencia fotográfica de las condiciones en las que se encontraban los vertederos, determinar el lugar específico donde se realizaría la caracterización y estimar los tiempos de viaje entre los sitios para programar los estudios.
- Se efectuaron pláticas con los pepenadores del vertedero de San Quintín para solicitar su apoyo en la realización del estudio y establecer los términos de trabajo. Se consideró su integración para evitar cualquier posible conflicto (estas personas son muy territoriales) y facilitar las labores de cuarteo de residuos y clasificación de materiales.
- Se identificó una báscula pública en Lázaro Cárdenas (a 100 metros de la entrada del camino hacia el vertedero) y se realizaron pláticas con el personal en turno para conocer las tarifas, horarios y solicitar su apoyo para este estudio.
- Se verificaron los datos de placa de los camiones recolectores para conocer su capacidad en m³. En San Quintín, este procedimiento se realizó en el patio de reparaciones de los vehículos de la delegación, mientras que en Vicente Guerrero se hizo en el sitio de disposición.
- Considerando la posibilidad de un muestreo estratificado, se solicitó al subdirector de servicios públicos información sobre las rutas de recolección para determinar la procedencia de los vehículos recolectores cuando se hiciera el estudio de caracterización.

3.2.2. Determinación del tipo de muestro a realizar

Se identificaron los estratos socioeconómicos en las poblaciones bajo estudio para establecer la necesidad de un muestreo estratificado. Para ello se empleó la base de datos "Composición de los estratos-AGEB", publicada por INEGI (2005), y se tomó como referencia el Área Geoestadística Básica (AGEB). Adicionalmente se buscó información sobre el sistema de recolección.



Se encontró que las AGEB's consideradas en San Quintín (8214, 8229, 8271 y 8286) y Lázaro Cárdenas (8591, 8604, 8619 y 8623) tienen nivel 5³, mientras que en Vicente Guerrero existen dos AGEB con nivel 5 (6171 y 7220), cuatro con nivel 3 (7235, 7396, 8290 y 8303) y una con nivel 1 (8657). Del sistema de recolección se supo que los camiones recolectores en ambas comunidades no trabajan por estrato socioeconómico, sino por capacidad del camión. Si terminan una ruta y no están muy cargados, comienzan a trabajar la siguiente ruta programada para ellos hasta llenar el camión.

Considerando que la composición de las AGEB's en dichas comunidades mantienen, en general, un solo tipo de estrato socioeconómico (medio-bajo) y la forma de operación del sistema de recolección, se decidió hacer un muestreo no estratificado.

3.3. Estudio de caracterización.

Debido a que el clima de la región bajo estudio es tipo mediterráneo, se realizaron estudios en dos periodos: invierno (Enero de 2009) y verano (Junio de 2009). Los meses seleccionados se consideraron representativos de cada estación.

Los residuos analizados se tomaron de las cargas depositadas en los vertederos por los camiones recolectores del Departamento de Aseo y Limpia (DAL). Se procedió así porque: (a) las limitaciones económicas y materiales para realizar este estudio impedían que se realizara un muestreo de tipo casa por casa; (b) Tchobanoglous et al. (1994) exponen que un muestreo doméstico representativo de residuos puede ser la carga de un camión que procede de una ruta típica recogida en un día laborable en una zona residencial.

³ Los estratos se numeran del 1 al 7 indicando con ello la situación en que se encuentran. El estrato 1 se asocia con la situación menos favorable, por el contrario, el estrato 7 comprende a las unidades (entidades, municipios o AGEBs) que reflejan la mejor situación relativa.

El muestreo se ajustó a los días en los que se presta el servicio de recolección debido a que los residuos analizados provenían de los camiones recolectores. Por ello, la toma de muestras fue de cinco días en Vicente Guerrero (lunes a viernes) y seis días en San Quintín (lunes a sábado). Los residuos analizados se consideraron representativos de la generación de una semana porque en ambas comunidades la recolección la realiza el DAL una vez por semana en cada ruta.

Para el estudio de la composición de los residuos se aplicó el método del cuarteo establecido en la norma mexicana NMX-AA-015-1985, publicada por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, SECOFI (1985a), considerando en cada uno de ellos solamente los residuos de la carga de un camión. Con el apoyo de pepenadores locales y el empleo de bieldos, se procedió a romper las bolsas con residuos y a mezclarlos uniformemente (para evitar contaminar los residuos con tierra, se dejó una base de residuos sobre la cual se realizó el cuarteo). Se eliminaron los cuartos opuestos A y C (ver Figura 3-3) y se homogenizaron nuevamente los residuos. Los residuos restantes del cuarteo fueron empleados para determinar el peso específico de los residuos, de acuerdo con la SECOFI (1985b).

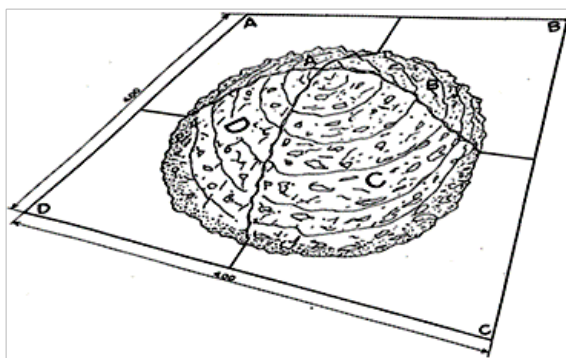


Figura 3-3. Cuarteo de residuos.

Fuente: SECOFI (1985a)

Para asegurar que los resultados obtenidos sean representativos, se tomaron muestras con un peso superior a los 50 kg. La SECOFI (1985a) indica que se debe de emplear un mínimo de 50 kg de residuos sólidos para hacer la selección de subproductos. Tchobanoglous et al. (1994)



exponen que las medidas hechas a partir de un muestreo del tamaño de unos 90 kg no varían significativamente de las tomadas en muestreos de hasta 770 kg, sacados de la misma carga de residuos. CalRecovery, Inc (1997) expone que el peso mínimo por muestra debe de estar en el orden de 100 kg; si es menos de 100 kg se reduce la posibilidad de obtener una muestra representativa. Otros autores establecen que el tamaño óptimo de la muestra es de 91 a 136 kg (Gidarakos et al., 2006; Zeng et al., 2005; Liu and Lipták, 2000; Liu et al., 1997).

Los pesajes de residuos in situ se realizaron con dos balanzas electrónicas portátiles: una Torrey EQB_50/100, con capacidad para 50 kg y sensibilidad de 10 gr, y una Torrey L-EQM 500/1000, con capacidad para 500 KG y sensibilidad de 100 gr. Para mayor precisión en los resultados, el peso de subproductos se realizó en la primera y los pesos específicos en la segunda.

3.3.1. Cuantificación de componentes

Para el análisis de la composición de residuos se consideraron 30 componentes: los 25 indicados por SECOFI (1985c) y cinco más que se anexaron in situ. Éstos fueron aluminio, baterías, envases asépticos (Tetra Pak), plástico PET y residuo electrónico (ver Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Componentes considerados en el estudio.

Componentes		
Algodón.	Lata.	Poliuretano.
Aluminio	Loza y cerámica.	Poliestireno expandido.
Baterías	Madera.	Residuos alimenticios.
Cartón.	Material de construcción.	Residuos de jardinería.
Cuero.	Material ferroso.	Residuo fino
Envase de cartón encerado.	Material no ferroso.	Residuos electrónicos
Fibra dura vegetal (esclerenquima).	Papel.	Envases asépticos
Fibras sintéticas.	Pañal desechable.	Tapo.
Hueso.	Plástico PET	Vidrio de color.
Hule.	Plástico rígido y de película.	Vidrio transparente.

Fuente: Adaptación de SECOFI (1985c)



3.3.2. Determinación de la generación total

La existencia de una báscula pública en San Quintín, permitió que se pudieran pesar los camiones recolectores antes y después de verter los residuos en el sitio de disposición final. El peso neto de los residuos se determinó por la diferencia entre el peso bruto y la tara de los camiones.

En Vicente Guerrero no fue posible pesar los vehículos por tres motivos: 1) no existe una báscula pública en esta comunidad y la más cercana se encontraba a 25 km; 2) los tiempos de recolección de las rutas son limitados, y 3) los costos asociados al movimiento de los camiones recolectores son elevados. Por ello, el peso total de los residuos se estimó empleando seis métodos distintos que se explican a continuación.

3.3.2.1. Estimación por similitud

Las características de los camiones recolectores de Vicente Guerrero coinciden con las del camión C-2005, que opera en San Quintín. La media muestral del peso de los RS recolectados por este camión en la semana de estudio se estimó en $3,021 \pm 543$ kg, considerando un intervalo de confianza del 98% y 8 muestras, empleando el estadístico t-student. Por tanto, la generación total de RS en Vicente Guerrero se estimó multiplicando la media muestral por el número total de viajes realizados en la semana en Vicente Guerrero (23).

3.3.2.2. Estimación con peso específico propuesto por Tchobanoglous

Tchobanoglous et al. (1994) exponen que la generación total de residuos puede ser conocida empleando la ecuación (1):

$$W_T = N \times v \times \rho \quad \text{ec. (1)}$$



donde N =número de cargas, v =volumen promedio en m^3 de los camiones recolectores y ρ =densidad en kg/m^3 de los residuos. Estos autores proponen un peso específico típico para RSM en camión compactador de $297 kg/m^3$.

El número de viajes en la semana de estudio en invierno fue de 24 en San Quintín y 23 en Vicente Guerrero; en verano fueron de 23 y 22, respectivamente. El volumen considerado para las cajas de los camiones recolectores fue de $15.29 m^3$ en Vicente Guerrero y de 15.93 para San Quintín. Este último valor es mayor porque en San Quintín opera un camión de 25 yardas cúbicas ($19.11m^3$).

3.3.2.3. Estimación con peso específico propuesto por Jiménez

El procedimiento emplea la ecuación 1 y considera un peso específico de $250 kg/m^3$. Este valor típico es el propuesto por Jiménez (2002) para los residuos sólidos en un camión compactador. Los datos empleados para estimar la generación total son los mismos que se indicaron en el apartado 3.3.2.2.

3.3.2.4. Estimación con peso específico en camiones de San Quintín

El procedimiento emplea la ecuación 1 y considera la media muestral del peso específico de los residuos en camiones recolectores de San Quintín. Este valor fue de $228.79 kg/m^3$ en el estudio de invierno y de $276.79 kg/m^3$ en el estudio de verano. Los datos empleados para estimar la generación total son los mismos que se indicaron en el apartado 3.3.2.2.

3.3.2.5. Estimación con peso específico y factor de compactación in situ

Esta es una modificación del método para la estimación de residuos propuesto por Tchobanoglous et al. (1994). La ecuación desarrollada se aprecia en la ec. 2.



$$W_T = \left[\sum_{i=1}^d (N_i \times v_i \times \rho_i) \right] (F_c) \quad \text{ec. (2)}$$

donde W_T es el peso total, d = número de días analizados, N = número de viajes de los camiones, v = promedio en m^3 de los camiones, ρ =peso específico promedio diario de los residuos sin compactar, y F_c = factor de compactación.

El factor de compactación empleado para inferir el peso total en Vicente Guerrero (1.77 en invierno y 1.72 en verano), fue el estimado para los camiones de San Quintín. Estos valores se obtuvieron de la siguiente forma:

- 1) Primero se obtiene el peso total diario estimado multiplicando el número de cargas (a), el volumen (b) y el peso específico (c). Los valores diarios son sumados para obtener el total semanal.

Cargas (a)	Volumen (b)	Peso específico (c)	Peso total (a*b*c)
4	15.93*	113.95	7260.89
6	15.93*	174.37	16666.28
4	15.93*	153.95	9809.69
4	15.93*	140.03	8922.71
3	15.93*	142.53	6811.51
Total:			49,471.09

*promedio volumétrico de camiones (existe un camión de 19.11m³ ó 25 yd³)

- 2) Se despejó F_c en la ecuación 2 y se sustituyeron valores en cada variable. W_T fue el valor del peso total de los vehículos durante la semana.

$$F_c = \frac{W_T}{\left[\sum_{i=1}^d (N_i \times v_i \times \rho_i) \right]} = \frac{87,470}{49,471} = 1.768 \cong 1.77$$

Se decidió usar éste factor porque las condiciones de operación de las cajas compactadoras de los camiones en ambos sitios son similares



3.3.2.6. Estimación con peso específico in situ y compactación del 50%

Los residuos sólidos municipales presentan un gran contenido de humedad debido principalmente a un alto porcentaje de materia orgánica, por lo que difícilmente puede compactarse a menos de la mitad de su volumen suelto. Dependiendo de las características de la basura, se logra una reducción de volumen en razón de 2:1 a 3:1 (SEDESOL, 1996). Por ello, se puede considerar que el factor de compactación de los equipos de recolección es del orden del 50%, es decir, $F_c = 1.50$. Sustituyendo este factor de compactación y los datos obtenidos in situ en la ecuación 2, se obtuvo el peso total de residuos en ambas comunidades.

3.3.3. Determinación de la generación per cápita (GPC)

SEDESOL (1996) indica que para determinar la producción de RS, en $\text{kg-hab}^{-1}\text{-día}^{-1}$, es preciso pesar todos los vehículos recolectores durante una semana (W_T) y dividir la carga total por la población atendida (H) y por siete días (ver ec. 3). El cálculo puede hacerse para toda una ciudad si se cuenta con un censo de población en el sector.

$$G_{pc} = \frac{W_T}{H \times 7} \quad \text{ec. (3)}$$

Este estudio se realizó en tres comunidades: San Quintín, Lázaro Cárdenas y Vicente Guerrero. No obstante, debido a que las dos primeras comunidades pertenecen a la misma delegación, son contiguas y comparte el mismo sistema de recolección y vertedero, se decidió considerarlas como una sola. Se determinó nombrarlas como San Quintín porque ésta comunidad es cabecera de Delegación y de Administración Regional. Por lo anterior, y considerando los datos del INEGI (2005), para la estimación de la GPC se consideró una población de 19,800 habitantes en San Quintín y de 10,632 habitantes en Vicente Guerrero.

Para la estimación de la generación per cápita en Vicente Guerrero, se utilizó la ec. 4, el valor de la media muestral (μ), el número de viajes (N) y el número de habitantes (H).



$$G_{PC} = \left[\frac{\left(\frac{\mu}{1 \text{ viaje}} \right) \left(\frac{N}{1 \text{ semana}} \right) \left(\frac{1 \text{ semana}}{7 \text{ días}} \right)}{H} \right] \quad \text{ec. (4)}$$

3.3.4. Análisis estadístico de los resultados

Para cada comunidad se hizo una prueba de proporciones para establecer si existía diferencia en la generación de RS entre la temporada de invierno (p_1) y la de verano (p_2). En los componentes que presentaron diferencias se hizo una nueva comparación de proporciones para identificar en qué temporada se generan más residuos, considerando como hipótesis alterna que en verano se generan más residuos que en invierno ($H_a: p_1 < p_2$). Por último, se comparó si existe diferencia en la generación de RS entre las comunidades. Para las comparaciones se empleó el software estadístico MINITAB® 14.1 con un intervalo de confianza de 98%.

El objeto de realizar este análisis estadístico fue establecer si las estrategias para el manejo de residuos en las comunidades deben ser las mismas durante el año y si las comunidades pueden compartir mecanismos de tratamiento. Por ello, para la prueba de proporciones sólo se incluyeron los componentes que pueden ser comercializados o aprovechados en las comunidades.

3.4. Entrevistas con actores clave

Considerando las indicaciones propuestas por algunos investigadores (Hernández et al., 2008; Martínez, 2006), se construyó un diagrama para visualizar los pasos a seguir durante el proceso de entrevistas. El resultado se expone en la Figura 3-4.

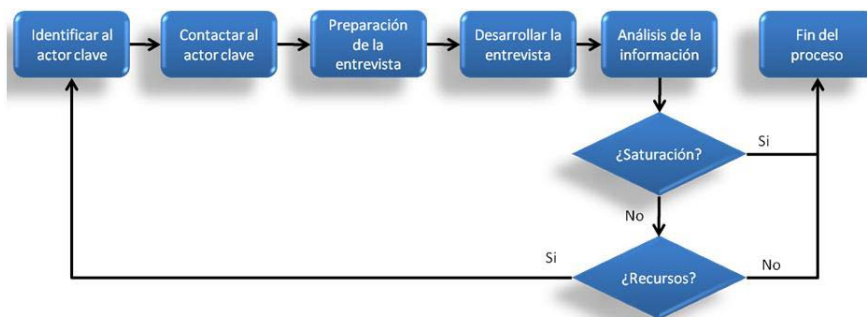


Figura 3-4. Esquema de trabajo para investigación de campo.

Se definieron estrategias de recolección pensando en los posibles escenarios. Para los casos donde no se permitiera el uso de grabadora, se escribiría rápido mientras hablaba el entrevistado; la escritura sería fluida y sin uso de preposiciones y artículos; los errores se indicarían por un subrayado sobre los mismos, sin borrar; las notas que no se pudieran terminar en el sitio de la entrevista, se terminarían dentro de los 30 minutos posteriores a la conclusión de la entrevista (para evitar omitir detalles o impresiones).

3.4.1. Criterios de selección de los participantes

Se iniciaron las entrevistas en la sindicatura del municipio por considerar que esta dependencia juega un papel importante en la identificación de los actores clave. La primera entrevista se hizo a un informante clave, quien proporcionó información y nombres de actores clave. Al término de esta entrevista, se buscó a los actores clave señalados para hacerles una entrevista. Este proceso (identificación-entrevista por bola de nieve) se realizó durante todo el proceso hasta donde se presentaba la saturación (mismos recomendados) o donde quedaban fuera de contexto (ámbito estatal o nacional).



3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos

Antes de elaborar los cuestionarios, se realizó trabajo documental sobre la problemática para identificar las preguntas pertinentes. Se consultaron artículos y reportes de otros sitios del país y el mundo sobre el tema y se sostuvieron pláticas con personal del Municipio de Ensenada. Las dudas que surgieron durante la investigación sobre la aplicación de tecnologías con recuperación de energía fueron anotadas en una bitácora y, posteriormente, analizadas para determinar aquellas que presentaran mayor pertinencia al tema de investigación.

Se determinó que las preguntas serían formuladas de acuerdo a las características de los entrevistados. Para el caso de informantes clave, se consideraron preguntas tendientes a recabar información para contextualizar (carácter general). Para los actores clave se consideraron preguntas más específicas de la problemática, dividiendo esas en tres categorías: problemática, tecnologías y decisiones (ver tablas Tabla 3-2 y Tabla 3-3). Debido a que los funcionarios públicos tienen tiempos reducidos para atención, se decidió aplicar entrevistas semi-estructuradas.

Tabla 3-2. Preguntas aplicadas a informantes clave.

Profesión		Tiempo en puesto		Edad	
Nivel de estudios		Nivel en TDD	Alto	Medio	Bajo
Dependencia			N/A		
¿Cuál es la función del departamento donde labora? ¿De qué departamento/dependencia/ depende su departamento? ¿De qué departamento/dependencia/ dependen de ustedes? ¿Qué dependencias manejan la problemática de la basura? ¿Sabe qué asuntos atiende cada una de estas dependencias? ¿En qué parte ubicaría su participación en el manejo de residuos? ¿A quiénes considera una autoridad/ personaje importante en el tema de los RSM? ¿Sabe de alguna página de internet, documento o sitio que brinde información sobre el tema de los RSM en Ensenada? COMENTARIO QUE DESEE AGREGAR EL ENTREVISTADO					



Tabla 3-3. Preguntas aplicadas a los actores clave.

Profesión		Tiempo en puesto		Edad	
Nivel de estudios		Nivel en TDD	Alto	Medio	Bajo
Dependencia					
Tema: Problemática					
¿Cuál es su percepción sobre la problemática de los RS en el municipio?					
¿Qué prioridad considera que tiene la problemática en la agenda pública?					
¿Conoce acciones que se están tomando para resolver la problemática?					
¿Sabe de alguna estrategia empleada para reducir los RS antes de que se depositen en los vertederos?					
¿Sabe de algún beneficio económico, social y ambiental que tenga el manejo de RS actual?					
¿Cuáles son las instancias para atender la problemática de RS?					
¿Tienen conocimiento del resultado de la actuación de estas instancias?					
¿Conoce cómo se les hace llegar la información de la problemática a estas instancias? (video, reportes, tv, quejas)					
¿En qué parte ubicaría su participación en el manejo de residuos?					
¿Qué piensa de la aplicación de fuentes alternas para generar energía?					
¿Pudiera mencionar al menos dos autoridades/ personajes importante en el tema de la basura a nivel municipal?					
Tema: Tecnologías					
¿Qué tecnologías de TRS conoce?					
¿Cuál es su opinión de las TRS que mencionó y por qué?					
¿Qué tratamiento de RS no aprueba y por qué?					
¿Sabe que se puede aprovechar los RS para generar energía eléctrica?					
¿Cuál es su opinión de la biodigestión, gasificación y plasma y por qué?					
¿Sabe de algún TRS que se esté usando en el estado y/o la región?					
¿Qué factores considera que impiden o favorecen la puesta en marcha de TRSCRE?					
¿Qué aspecto considera importantes en una TTRS?					
Tema: Decisiones					
¿Quiénes intervienen en la problemática de los residuos?					
¿Quiénes deciden las acciones a seguir por el municipio respecto al problema de los RS?					
¿Sabe de algún criterio empleado para decidir sobre un equipo/tecnología?					
¿Quiénes pudieran afectar la toma de una decisión sobre una tecnología?					
COMENTARIOS QUE DESEE AGREGAR EL ENTREVISTADO					

Al final de cada entrevista se llenó un registro de observación general (ver Tabla 3-4). Esto permitió comprender la situación a medida que se iba avanzando, y coadyuvó a puntualizar cierta información en las entrevistas posteriores.

Tabla 3-4. Formato de registro-resumen de observación general.

REGISTRO-RESUMEN DE OBSERVACIÓN GENERAL.		
Estudio sobre los obstáculos para la puesta en marcha de tecnología para el tratamiento de residuos.		
Fecha: _____	Hora: _____	Episodio, reunión, observación: _____
Participantes: _____		
Lugar: _____		
Temas principales. Impresiones. Resumen de lo que sucede en el evento. Explicaciones o especulaciones, e hipótesis de lo que sucede en el lugar o contexto. Explicaciones alternativas. Reportes de otros que experimentan o viven la situación. Siguiendo pasos en la recolección de datos. Revisión, actualización. Implicaciones de las conclusiones.		

Fuente: Hernández et al. (2008)



3.4.3. Contexto de la recolección

Las entrevistas se realizaron en los sitios de trabajo de los entrevistados debido a las actividades y el tiempo de los entrevistados, que impedían que se realizaran en otro sitio. Los horarios de entrevista fueron establecidos por los entrevistados.

3.4.4. Procedimiento para la reducción de sesgos personales

Previo a la entrevista, se realizó una plática informal con los entrevistados con la finalidad de “romper el hielo” con el entrevistado y dar un ambiente más relajado. Se les hizo saber cuál era la finalidad del estudio y el por qué se les había considerado para entrevistarlos.

En el caso de algunos entrevistados, se permitió el uso de grabadoras. Esta situación dio más fluidez a la entrevista y permitió incluir preguntas adicionales para comprender mejor el contexto de los temas discutidos. Este hecho se presentó principalmente con los actores clave con alto nivel de influencia en la toma de decisiones.

Durante el proceso de entrevista, se utilizó la información previa para enriquecer la entrevista. Se buscó información en internet, en documentos públicos y se sostuvieron pláticas informales con personal auxiliar de las dependencias. Para reforzar la transferibilidad de la información, se acopió la mayor cantidad de información, de acuerdo a las posibilidades, para establecer correspondencia entre el contexto investigado y otros similares, y aumentar la transferibilidad de los resultados.

Con la finalidad de evitar sesgos, se evitó dar explicaciones durante la entrevista. Se hicieron aclaraciones sobre las preguntas, pero no se les explicó más. Esta situación se presentó principalmente en las preguntas sobre tecnologías de tratamiento propuestas.

3.4.5. Análisis de la información

Para crear significados, los datos recabados se estructuraron siguiendo la metodología de Martínez (1999). Para ello, el primer paso fue transcribir todas las entrevistas grabadas. Posteriormente se categorizó la información dividiendo el contenido en unidades temáticas (párrafos que expresen una idea o concepto central) y asignando un término o expresión a cada unidad temática. En el caso de las categorías que presentaron propiedades o atributos diferentes, se asignó una sub-categoría. Esta etapa del proceso se realizó empleando el software Atlas.ti. A la vez que se realizaba la categorización, se observaron relaciones y se construyeron redes y significados. Una vista parcial de la red construida se muestra en la Figura 3-5.

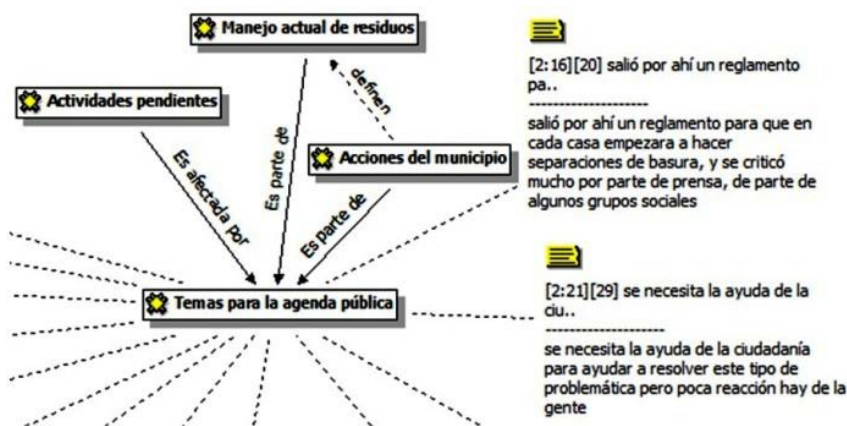


Figura 3-5. Redes de información

3.5. Encuestas a la comunidad

Inicialmente, el objetivo de esta actividad era conocer la percepción y el grado de aprobación de la sociedad sobre las tecnologías de tratamiento de residuos con recuperación y energía. Posteriormente, considerando la pertinencia y las observaciones *in situ*, se decidió incluir preguntas sobre reciclaje, incineración de residuos y el sistema de recolección.



Una vez definido el objetivo, se elaboró el cuestionario que se aplicaría a la comunidad y se definió la estrategia para su aplicación en las comunidades. Para evitar sesgar la información de San Quintín-Lázaro Cárdenas, se aplicaron los cuestionarios de forma proporcional (de acuerdo a la población de cada sitio), por lo que se trabajó en dos grupos de forma simultánea, uno en cada comunidad. En Vicente Guerrero el equipo trabajó completo.

La información recolectada en las entrevistas fue concentrada y analizada utilizando el software Excel®. Para las preguntas en escala de Likert, se obtuvieron los índices de cada pregunta dividiendo la suma de las respuestas obtenidas entre el máximo valor posible para cada pregunta. Los valores obtenidos fueron presentados en un diagrama de radar.

3.5.1. Instrumento para la recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizó un cuestionario que incluyó preguntas sobre el manejo de los residuos (17), percepción del sistema de recolección (4) y conocimiento de tecnologías para tratar los residuos (6). Las preguntas fueron elaboradas en una escala de Likert de cinco puntos, donde 0 representa una condición de desacuerdo y 4 de acuerdo. De las preguntas sobre reciclaje y tecnologías, siete se elaboraron considerando respuestas dicotómicas (si o no), dos de tipo abierta y el resto se dejó con opción múltiple. En las preguntas sobre la aprobación de las tecnologías, se realizó una breve descripción sobre operación y productos obtenidos de cada una de ellas con la intención de reducir cualquier posible sesgo. Este instrumento fue validado en dos ocasiones (con 14 personas cada vez) antes de su aplicación en campo.



3.5.2. Contexto de la recolección

El estudio se llevó a cabo en septiembre de 2009 en Vicente Guerrero y San Quintín-Lázaro Cárdenas. Los cuestionarios se aplicaron por entrevista personal en calles, plazuelas, casas, estacionamientos y sitios de trabajo. La selección de entrevistados se restringió a personas que vivieran en las comunidades bajo estudio y fueran mayores de 16 años.

3.5.3. Determinación de la muestra

El tamaño de la muestra fue de 96 para cada población y se obtuvo empleando el software Stats®. Para la obtención se consideró la población de cada comunidad, un error del 10%, una distribución de respuestas del 50% y un nivel de confianza del 95%. Este valor también puede ser estimado empleando la ecuación propuesta por D'Astous et al. (2003) para el cálculo de muestras cuando se conoce la población.

$$n = \frac{Np(1-p)}{\frac{(N-1)ME^2}{Z_{\alpha/2}^2} + p(1-p)} \quad \text{ec. (5)}$$

Donde N= tamaño de la población, p = probabilidad de ocurrencia del fenómeno, ME = es el margen de error, y $Z_{\alpha/2}^2$ = nivel de confianza o certidumbre (este valor se obtiene de la tabla de valores de probabilidad acumulada para la Distribución Normal Estándar). Considerando la información previa, se puede estimar la muestra para Vicente Guerrero en:

$$n = \frac{Np(1-p)}{\frac{(N-1)ME^2}{Z_{\alpha/2}^2} + p(1-p)} = \frac{(10,632)(0.5)(0.5)}{\frac{(10,632-1)(0.1)^2}{(1.96)^2} + (0.5)(0.5)} = \frac{2658}{27.92} = 95.19 \rightarrow 96$$

3.6. Aplicación del AHP

Para la selección de las tecnologías se utilizó el AHP porque no fue posible encontrar información cuantitativa en todos los criterios y subcriterios para aplicar la técnica SMART. Definido el método de evaluación, se estableció el objetivo principal en la resolución de problema, que en este caso fue la selección del tratamiento de residuos sólidos adecuado a las



características de las comunidades estudiadas. Posteriormente, se integró un equipo con tres investigadores y un experto en el área. Para facilitar el proceso de selección, se utilizó el CDP.

3.7. Construcción de la jerarquía

Con la finalidad de ofrecer alternativas a los tomadores de decisiones, se consideraron tecnologías con costos de inversión bajo, medio y alto. De acuerdo a las revisiones en la literatura científica, se pre-seleccionaron el digestor de una etapa (BDG), el gasificador de flujo o lecho descendente (GFD) y el gasificador de plasma (GP) como opciones para las comunidades bajo estudio.

El relleno sanitario no fue considerado como alternativa por dos razones: (a) el objetivo de este estudio no es proponer tratamientos de RS para eliminar los rellenos sanitarios/vertederos, sino proponer aquellos que recuperen el valor remanente de los residuos y por tanto desvíen materiales del flujo que se deposita en el relleno/vertedero, para incrementar la vida útil de éstos y la sustentabilidad; y (b) se requiere la operación de vertederos para recibir aquellos componentes que no pueden ser procesados o tratados por las tecnologías mencionadas. Ersoy y Bulut (2009) indican que la construcción de los rellenos sanitarios no es una opción alternativa, ya que un relleno es siempre un componente necesario del sistema de gestión de residuos específicos que serán desarrollados.

El equipo de trabajo realizó una lluvia de ideas para listar los posibles aspectos que pueden influir en cada uno de los criterios seleccionados (aspectos ambientales, económicos, sociales y políticos). Posteriormente se depuró la lista considerando los criterios en la evaluación tecnológica señalados por algunos autores (Quintanilla, 1999; Gupta and Lewis, 1993; Shrader-Frechette, 1985) y la factibilidad de seguimiento sobre el tiempo. Con los resultados obtenidos, se construyó la jerarquía. El resultado se expone en la Figura 3-6.

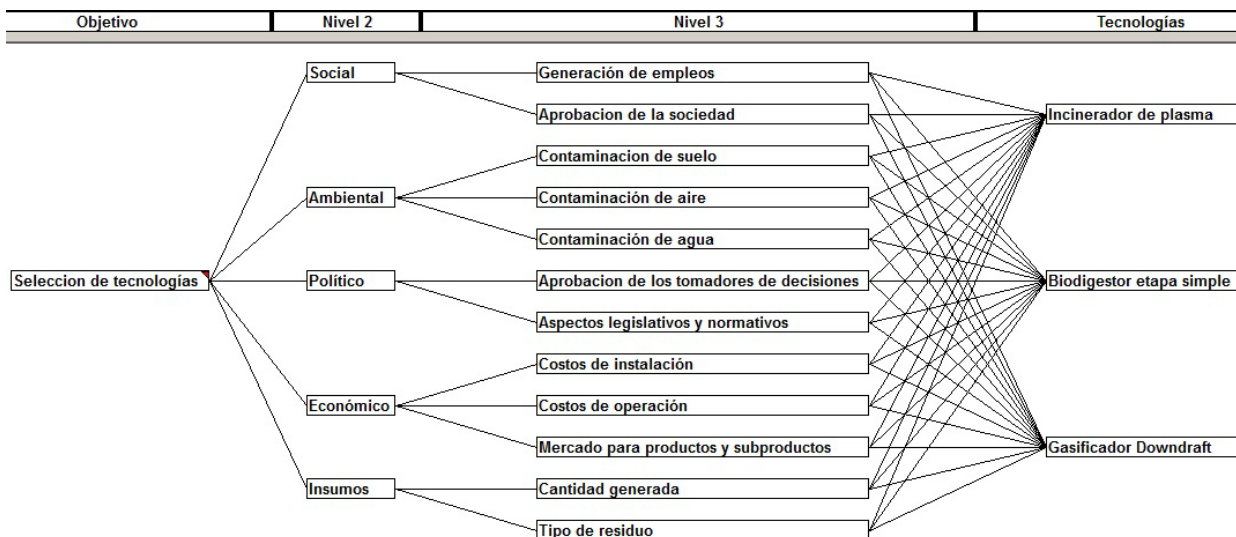


Figura 3-6. Jerarquía para seleccionar tecnologías de tratamiento.

3.7.1. Ponderación de criterios

La ponderación de cada criterio se hizo de acuerdo a los resultados obtenidos en entrevistas, redes de cooperación y revisión bibliográfica. Toda la información obtenida fue analizada y categorizada para su utilización en CDP.

Para evitar inconsistencias en la evaluación, se utilizó la aplicación "método abreviado de comparación por pares", integrada en el software CDP (ver Figura 3-7). Esta es una aproximación a la comparación de pares completa que omite algunas comparaciones. Se basa en la suposición de que si A es (x) veces mejor que B, y B es (y) veces mejor que C, entonces A es (x*y) veces mejor que C. La comparación de A a C no es necesaria entonces.

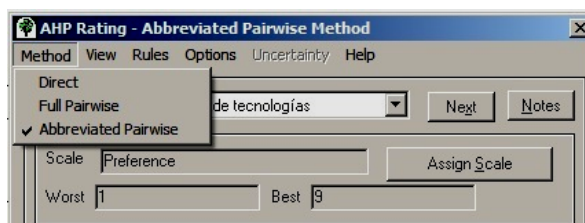


Figura 3-7. Método de comparación



Para ingresar los valores en el software, se seleccionó de una lista (ver Figura 3-8) la escala verbal correspondiente.

Subcriterion	Weight	Subcriterion
Criterion	1	
	Equal	
	Barely Better	
	Weakly Better	
	Moderately Better	
	Definitely Better	
	Strongly Better	
	Very Strongly Better	
	Critically Better	
	Absolutely Better	

Figura 3-8. Lista de escalas verbales

Un ejemplo de cómo se determina el valor de cada comparación por pares se enuncia a continuación. En la ponderación de los criterios, se considera que el aspecto económico y el político están fuertemente ligados y se consideraron altamente influyentes en la toma de decisiones. De acuerdo a opiniones de tomadores de decisiones, la capacidad de gestión de los cabildos para la obtención de recursos públicos influye en la cantidad de recurso programado para un municipio. Adicionalmente, las políticas federales influyen en la cantidad de recursos que se destinan a rubros como seguridad pública, seguridad social, por mencionar algunos. Las políticas de inversión para el manejo de residuos sólidos las maneja el estado y posteriormente la baja a los municipios, sin asignar partidas especiales para la problemática de los residuos.

Del estudio sobre la toma de decisiones, se corroboró que las inversiones municipales en el manejo de residuos se hacen principalmente en la parte de recolección, con la adquisición de camiones recolectores. Informantes clave mencionaron que el gobierno invierte en aquello que pueda ser visto por las personas, como los camiones, debido a que políticamente es más redituable. Los efectos de una inversión en un relleno sanitario no son visibles por la sociedad, mientras que leer en el periódico sobre la compra de nuevos camiones da la sensación de respuesta al problema de los residuos.



Por lo expuesto anteriormente, se consideró que el aspecto político es ligeramente superior (valor 2) al aspecto económico en la toma de decisiones y críticamente mejor (valor 8) que el aspecto ambiental.

En los antecedentes de este estudio, se mencionó que las autoridades municipales están actuando para evitar problemas sanitarios y disconformidad social en las comunidades, pero el manejo precario en la etapa de disposición final está provocando contaminación del suelo y el aire. A pesar de que la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos prohíbe la quema de residuos, las autoridades siguen permitiendo que personas sin preparación alguna en el manejo de residuos (pepenadores) realicen quemas para controlar los niveles de residuos en los vertederos. Por tanto, se consideró que el aspecto social es débilmente mejor (valor 3) que el aspecto ambiental.

Los insumos, que en esta situación serían los residuos sólidos, se consideraron con igual importancia (valor 1) que el aspecto ambiental debido a que la generación de residuos difícilmente decrecerá a tal grado que desincentive las actividades de tratamiento de residuos. La valuación final de todos los criterios se presenta en la Figura 3-9.

Figura 3-9. Valuación de criterios



3.7.2. Ponderación de subcriterios

En este apartado se presenta la ponderación de los subcriterios. Esta se muestra por separado para cada uno de los criterios social, ambiental, político y económico.

3.7.2.1. Social

Los actores clave consideran que el principal criterio social en la selección de una tecnología es la generación de empleos. Sin embargo, reconocen que la aprobación social es importante para concretar proyectos de beneficio público. Quintanilla (1999) considera como principal criterio en la evaluación tecnológica la creación de empleos. Por ello, se determinó que el subcriterio "generación de empleos" es moderadamente superior (valor 4) respecto al de "aprobación de la sociedad".

En lo referente a la cantidad de empleos generados en cada una de las opciones consideradas, esta varía según el objetivo deseado, la tecnología empleada, el grado de automatización, la disponibilidad de financiamiento, entre otros aspectos. Por lo expuesto en el capítulo dos, se considera que el digestor es definitivamente mejor (valor 5) que el gasificador de plasma y débilmente mejor (valor 3) que el gasificador de flujo descendente. Sobre el grado de aceptación que tuvieron los actores clave (ver 4.3) y los residentes (ver 4.4), se consideró al gasificador mucho más fuerte (valor 7) que el gasificador de plasma y con igual peso (valor 1) respecto al GFD.

3.7.2.2. Ambiental

En el aspecto ambiental, la contaminación del suelo, aire y/o agua provocan serios problemas a la salud humana y a la biodiversidad. Por ello, se consideró que estos criterios deben de ser ponderados con el mismo valor (1).



Considerando las características ambientales de cada tecnología (expuestas en 2.2), se considera que en términos de riesgo de contaminación de suelo y agua, el GFD es moderadamente mejor que el digestor (valor 4) y críticamente mejor (valor 9) que el GP. En términos de riesgo de contaminación del aire, el digestor es definitivamente mejor (valor 5) que el GDF y críticamente mejor (valor 8) que el GP.

3.7.2.3. Político

En términos legislativos y normativos (ver 2.3), el digestor tiene mayores posibilidades de desarrollo e incentivos que las otras tecnologías, por tratarse de un tratamiento no térmico. Por tanto, se puede considerar que el digestor es absolutamente mejor (valor 9) que la incineración por plasma y fuertemente mejor (valor 6) que el gasificador de flujo descendente.

Sobre las preferencias que los tomadores de decisiones mantienen hacia las tecnologías, se apreció que el digestor es el más aceptado, siguiendo el gasificador de flujo descendente. La postura hacia el gasificador por plasma fue de rechazo, argumentando los mismos motivos que expuso la sociedad para rechazarlo (oportunidad de aprovechar materiales valiosos y reintegrar a la naturaleza los nutrientes de los residuos orgánicos). Por tanto, en términos de aceptación, se considera que el digestor es absolutamente mejor (valor 9) que la incineración por plasma y ligeramente mejor (valor 2) que el gasificador de flujo descendente.

3.7.2.4. Económico

Respecto a los costos de instalación y operación (ver 2.2), el digestor es definitivamente mejor (valor 5) que el gasificador de plasma y débilmente mejor (valor 3) que el gasificador de flujo descendente. Respecto al mercado para subproductos, se considera que el gasificador de plasma



es fuertemente mejor (valor 6) que el digestor y absolutamente mejor (valor 9) que el gasificador de plasma.

3.7.2.5. Insumos

De acuerdo a la composición de residuos encontrada en las comunidades, se aprecia que los componentes que pueden ser tratados por el digestor (residuos alimenticios y residuos de jardinería) corresponden al 35-40% de los residuos generados; los componentes que pueden ser tratados por el gasificador de flujo descendente (cartón, papel, madera, residuos de jardinería) corresponden al 14-16%; y los componentes que pueden ser tratados por plasma corresponden al 85-90%. Por tanto, considerando el potencial para tratar la mayoría de los residuos, se aprecia que el gasificador de plasma es fuertemente mejor (valor 6) que el digestor y este a su vez es moderadamente mejor (valor 4) que el gasificador de flujo descendente.

3.7.3. Análisis de sensibilidad

Cuando se asigna peso a un subcriterio con respecto a un criterio padre, se da al modelo de decisión el poder para discriminar entre las alternativas consideradas. Cuando se termina de calificar el modelo, un cambio en el valor del peso asignado anteriormente puede cambiar la decisión de las puntuaciones de las alternativas. Esto puede provocar que la alternativa preferida actual sea reemplazada por una alternativa diferente. Si el ordenamiento de las alternativas principales cambia con el mínimo cambio en un determinado peso, entonces el modelo de decisión se dice que es "sensible" a ese peso. Dado que muchos de los pesos que entran, sobre todo en los niveles más abstractos del modelo más cercano a la meta, se basan en juicios cualitativos de su parte, es importante para comprender si el modelo es muy sensible a los valores de pesos (InfoHarvest Inc, 2002). Considerando lo anterior, se realizó el análisis de sensibilidad del modelo aplicando el CDP. Para ello, se seleccionó Sensibilidad por pesos en el menú Análisis.

4. RESULTADOS

El presente capítulo muestra los resultados de cada proceso de esta investigación y se encuentra dividido en cuatro partes. En la primer parte se exponen los resultados sobre los estudios de composición y generación de residuos, y de reconocimiento del sistema de gestión de residuos. En la segunda se muestran los hallazgos de las entrevistas realizadas a los actores clave. En la tercera se presentan los índices obtenidos sobre el conocimiento y posición de los residentes hacia las tecnologías. En la última sección se presentan los resultados de las ponderaciones de cada criterio en la jerarquía construida, la puntuación total de cada alternativa obtenida con AHP y los resultados del análisis de sensibilidad del modelo.

4.1. Manejo de residuos

4.1.1. Recolección de residuos

En ambas comunidades, el servicio de recolección lo otorga gratuitamente el municipio a través del DAL y no está concesionado en ninguna etapa de su proceso. La recolección se realiza por acera, de forma no mecanizada y se hace una vez por semana en un solo turno. Los usuarios del servicio colocan sus contenedores en la acera únicamente el día de la recolección.

Los equipos de recolección en ambas comunidades son camiones compactadores de carga trasera, cuya edad promedio es de 10 años. Cada camión opera con un chofer y dos



ayudantes. En San Quintín se cuenta con cinco unidades con capacidad de 15.3 m^3 (20 yd^3) y una de 19.11 m^3 (25 yd^3) y en Vicente Guerrero con dos unidades con capacidad de 15.3 m^3 (20 yd^3).

4.1.2. Sitios de disposición

Los residuos recolectados por el DAL y particulares en San Quintín y Vicente Guerrero se disponen a cielo abierto. Los vehículos recolectores depositan los residuos sólidos directamente sobre el suelo de un vertedero, el cual no cumple los requisitos establecidos por la NOM-083-SEMARNAT-2003. La recuperación de materiales se deja a los pepenadores una vez que se vacía el camión recolector.

En San Quintín, el vertedero se localiza en la latitud $30^\circ 31' 24.45''$, longitud $-115^\circ 53' 40.26''$, a 3 km hacia el este de la comunidad de Lázaro Cárdenas y se asienta en un predio ejidal de 20 hectáreas. Este vertedero carece de cerca perimetral y su operación y administración es realizada por residentes del ejido. En Vicente Guerrero, el vertedero se encuentra en la latitud $30^\circ 42' 43.58''$, longitud $-115^\circ 58' 24.00''$, a 3 km hacia el este de la carretera transpeninsular y se asienta en un predio privado con una superficie de 2 hectáreas. Este vertedero cuenta con cerca perimetral y es administrado por un particular. En ambos vertederos el acceso es de terracería y a su alrededor se encuentran campos de cultivo.

4.1.3. Tratamiento final de residuos

El tratamiento final que se da a los RS depositados en los vertederos por el DAL difiere en cada comunidad. En San Quintín los pepenadores recuperan algunos materiales valiosos (aluminio, hojalata y residuos ferrosos) y el resto lo dispersan para incinerarlos al aire libre cada tercer día. Las cenizas de los RS incinerados son cubiertas con nuevas capas de RS que posteriormente serán incinerados. En Vicente Guerrero los RS se acumulan y al tercer día son



incinerados. Las cenizas de los RS incinerados son cubiertas con tierra y compactados ligeramente con un tractor Caterpillar® D4.

4.1.4. Pepenadores.

Los pepenadores que laboran en el vertedero de San Quintín (aproximadamente 20) son controlados por dos lideresas. Ellas son quienes concentran y venden los materiales recuperados por los pepenadores y deciden quien trabaja en que zona. En el vertedero de Vicente Guerrero no hay pepenadores porque se les impide la entrada.

4.2. Caracterización de residuos

En San Quintín se analizaron un total de 12 muestras con un peso total de 1152.72 kg y en Vicente Guerrero 10 muestras con peso total de 770.43 kg.

4.2.1. Composición de los residuos

La composición encontrada en cada temporada se presenta en la Tabla 4-1. El cuero, envase de cartón encerado, fibra dura vegetal, material no ferroso, poliuretano, residuo fino, residuo animal fueron agrupados en un solo componente (Otros), debido a sus pequeñas cantidades respecto a la composición general de los RS.

4.2.1. Generación de residuos

Los resultados de la estimación del peso total por cada método se expone en la Tabla 4-2. Se aprecia que únicamente en las estimaciones realizadas a partir de valores típicos existe una variación negativa en las dos temporadas en ambas comunidades.



Tabla 4-1. Composición de residuos en ambas comunidades

Componentes	San Quintín						Vicente Guerrero					
	Invierno		Verano		Total		Invierno		Verano		Total	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Aluminio	5.0	0.8	3.5	0.7	8.5	0.7%	1.2	0.5	2.8	0.6	4.1	0.5%
Baterías	1.1	0.2	0.1	0.0	1.2	0.1%	0.1	0.1	0.2	0	0.3	0.0%
Cartón	39.3	6.4	19.3	3.6	58.6	5.1%	9.4	3.5	12.6	2.5	22.0	2.9%
Lata	14.3	2.3	8.8	1.6	23.1	2.0%	5.4	2	7.4	1.5	12.7	1.6%
Loza y cerámica	2.2	0.4	1.1	0.2	3.3	0.3%	1.0	0.4	3.1	0.6	4.1	0.5%
Madera	4.6	0.8	0.7	0.1	5.4	0.5%	0.2	0.1	2.0	0.4	2.2	0.3%
Material de construcción	3.4	0.6	13.5	2.5	16.9	1.5%	0.6	0.2	1.2	0.3	1.8	0.2%
Material ferroso	2.0	0.3	0.6	0.1	2.6	0.2%	0.8	0.3	0.4	0.1	1.2	0.2%
Papel	33.7	5.5	27.1	5.0	60.7	5.3%	16.0	6	28.2	5.6	44.2	5.7%
Pañal desechable	48.1	7.8	55.1	10.3	103.1	8.9%	37.3	14	71.1	14.1	108.4	14.1%
Plástico	91.1	14.8	85.7	16.0	176.8	15.3%	31.8	12	80.7	16	112.5	14.6%
Residuos alimenticios	209.4	33.9	138.7	25.8	348.2	30.2%	81.4	30.6	123.1	24.4	204.5	26.5%
Residuos de jardinería	11.8	1.9	35.8	6.7	47.6	4.1%	14.9	5.6	50.4	10	65.3	8.5%
Residuos electrónicos	2.1	0.3	0.7	0.1	2.8	0.2%	1.0	0.4	3.3	0.7	4.3	0.6%
Envases asépticos	3.9	0.6	2.6	0.5	6.5	0.6%	2.1	0.8	1.8	0.4	3.9	0.5%
Trapo	45.8	7.4	58.0	10.8	103.7	9.0%	16.3	6.1	28.2	5.6	44.5	5.8%
Vidrio de color	6.7	1.1	2.1	0.4	8.8	0.8%	2.8	1.1	4.4	0.9	7.2	0.9%
Vidrio transparente	15.6	2.5	11.7	2.2	27.3	2.4%	13.4	5	13.1	2.6	26.4	3.4%
Papel sanitario	47.9	7.8	42.1	7.8	90.0	7.8%	22.0	8.3	39.8	7.9	61.8	8.0%
Otros	29.4	4.8	30.3	5.6	59.7	5.2%	8.4	3.2	30.7	6.1	39.1	5.1%

Tabla 4-2. Estimación de la generación total de RS

Metodología empleada	Generación total en San Quintín (kg/día)			Generación total en Vicente Guerrero (kg/día)		
	Enero	Junio	Variación	Enero	Junio	Variación
Pesaje directo de residuos.	87,470	101,430	13,960			
Estimación por similitud				69,512	87,151	17,639
Peso específico típico propuesto por Tchobanoglous.	113,549	108,818	-4,731	104,446	99,905	-4,541
Peso específico típico propuesto por Jiménez	95,580	91,598	-3,982	87,918	84,095	-3,823
Peso específico de camiones en san Quintín.	87,470	101,540	14,070	80,458	93,107	12,649
Peso específico de muestras in situ y factor de compactación in situ.	87,407	101,370	13,963	77,904	86,016	8,112
Peso específico de muestras in situ y factor de compactación al 50%.	98,942	117,793	18,851	88,188	99,951	11,763



4.2.2. Generación per-cápita de residuos

Los resultados de la estimación de la GPC (Tabla 4-3) indican que en ambas localidades hubo una mayor generación de residuos en la temporada de verano que en la de invierno.

Tabla 4-3. Generación de residuos per-cápita diaria

Metodología empleada	Generación per-cápita en San Quintín (kg/día-hab)			Generación per-cápita en Vicente Guerrero (kg/día-hab)		
	Enero	Junio	Dif	Enero	Junio	Dif
Pesaje directo de residuos.	0.631±0.345	0.732±0.077				
Estimación por similitud				0.934±0.168	1.171±0.181	
Peso específico típico Tchobanoglous.	0.819	0.785	-0.034	1.403	1.342	-0.061
Peso específico típico Jiménez	0.690	0.660	-0.030	1.181	1.130	-0.051
Peso específico de camiones en san Quintín.	0.631	0.733	0.102	1.081	1.251	0.170
Peso específico de muestras in situ y factor de compactación in situ.	0.631	0.731	0.100	1.047	1.156	0.109
Peso específico de muestras in situ y factor de compactación al 50%.	0.714	0.850	0.136	1.185	1.343	0.158

4.2.3. Análisis estadístico

Los resultados de las pruebas de proporciones (P-value) se presentan en la Tabla 4-4. El valor de la prueba debe ser inferior al nivel de significancia seleccionado ($\alpha=0.02$) para indicar una diferencia significativa. En la Tabla 4-4 se puede apreciar que existe diferencia significativa en dos fracciones.

Tabla 4-4. P-Value de las fracciones analizadas.

Fracción analizada	Ha $p_1 \neq p_2$		
	P-value		
	San Quintín (SQ) a	Vicente Guerrero (VG) a	SQ vs VG b
Residuos alimenticios	0.003	0.076	0.081
Plástico	0.552	0.117	0.638
Cartón	0.028	0.541	0.011
Papel	0.714	0.796	0.684
Madera-residuos de jardinería	0.001	0.017	0.001
Vidrio	0.345	0.113	0.149

^a comparación de proporciones de RS generados en invierno (p_1) vs verano (p_2).

^b comparación de proporciones de la composición entre las comunidades



4.3. Entrevistas a actores clave

Los datos fueron recolectados en siete entrevistas semi-estructuradas llevadas a cabo a nivel municipal durante el primer semestre del 2009. Se realizaron un total de siete entrevistas a personajes clave a nivel municipal y estatal y cuatro a informantes clave a nivel municipal. Un registro de observación se expone en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Registro de observación general

REGISTRO-RESUMEN DE OBSERVACIÓN GENERAL.					
Estudio sobre los actores clave para la puesta en marcha de TTRSCRE.					
Fecha:	20-mzo-2009	Hora:	14:00	Episodio, reunión, observación:	Reunión
Participantes:		(confidencial)			
Gatekeepers		(confidencial)			
Lugar:		(confidencial)			
Temas principales. Impresiones. Resumen de lo que sucede en el evento. Los comentarios del entrevistado fueron: Los ayuntamientos buscan invertir en acciones que sean visibles; arreglar el relleno no es visible. Inversión en camiones recolectores, dan números. Se prefiere invertir en camiones que en el relleno. Invertir en rellenos políticamente no se ve, la gente no va a los rellenos a ver las obras. Movieron un cartelón (publicidad de inversión) a la carretera para que se viera, estaba en el relleno. Al gobierno le gusta hacer cosas que se luzcan. El relleno de San Quintín es de los mejores que tiene el municipio (el caso drástico es el del Rosario, 5km de basura a los costados de la carretera...nadie le ha entrado). En la ley de egresos federal no hay recursos destinados para rellenos (menos para tratamientos). En la federación no se tienen partidas destinadas a los residuos sólidos. Los ayuntamientos toman dinero de las partidas para hacer frente al problema; también toman dinero de lo recaudado. Mantenimiento de los vertederos con maquinaria del Ayuntamiento; sale costoso por movimiento de camas bajas, operadores y diesel. Hubo un recurso federal de Hábitat por 1 MP para el vertedero de San Quintín, pero hubo problemas y se pasó al de Vicente Guerrero. Estimó una vida útil para VVG de 20-25 años. Comento que sabe que se tienen terrenos a un lado del vertedero actual, pero desconocía que ya iban a cerrar el vertedero actual. Los problemas en las 23 delegaciones se resuelven allá mismo.					
Explicaciones o especulaciones, e hipótesis de lo que sucede en el lugar o contexto. El entrevistado está en contacto directo con la problemática, ya que trabaja como XXXXXX. Las secretarías mencionaron que trabaja estrechamente con XXXXXX. Proposición o hipótesis: aunque proporcionó información valiosa sobre contactos, el entrevistado no tiene peso alguno en la toma de decisiones.					
Explicaciones alternativas. Reportes de otros que experimentan o viven la situación. No hubo oportunidad de preguntarle a otras personas su opinión respecto a lo expuesto por el entrevistado.					
Siguientes pasos en la recolección de datos. Solicitar entrevista con Biólogo Héctor Chávez, director de Ecología. Acudir a entrevista con el Síndico, Ing. Jorge Camargo Villa. Entrevista con Ing. Jaime Fernández, coordinador de delegaciones (está en Ayuntamiento) Regidores (están en el segundo piso en palacio municipal)					
Revisión, actualización. Implicaciones de las conclusiones. Se seguirán entrevistando a informantes clave para conocer más sobre la problemática, aunque por sus puestos no tengan peso en las decisiones. Esto se pretende hacer porque creemos que los actores clave pueden omitir información que pueda ser crucial para comprender la problemática.					



4.3.1. Transcripción de entrevistas y análisis de la información

A manera de ejemplo, en la Tabla 4-6 se presenta la primer parte de la transcripción una entrevista. Se omite el nombre del entrevistado por razones de confidencialidad. El resultado del proceso de análisis fue una red de relaciones (ver Figura 4-1) que muestra la complejidad del sistema.

Tabla 4-6. Transcripción de entrevistas

Categorización		Texto	Pág. 1
	1	I: La primera ¿Cuál es su percepción sobre la problemática de los residuos sólidos en el	
	2	municipio?	
	3	E: Mira, ahorita afortunadamente en lo que va de esta administración... eh...vamos bien	
	4	(pausa) de lo que es la recolección de, de uso doméstico en sí la zona domiciliaria y todo eso.	
	5	Andamos en un etapa bastante positiva. Considero que si le ponemos una calificación	
	6	andaríamos en un, 97-98%, facilito.	
	7	I: En recolección...	
	8	E: En recolección...	
	9	I: Ahh, ok, perfecto... (pausa) ¿Qué prioridad considera que tiene la problemática de los	
	10	residuos en la agenda pública?	
	11	E: ¿Me repites la pregunta?	
	12	I: ¿Qué sí que prioridad considera que tiene la problemática en la agenda pública?	
	13	E: Pues la, la tiene al 100%. Arriba subir inicio documento	
	14	I: Pero con respecto, por ejemplo está desarrollo social, está seguridad pública, ¿en qué orden	
	15	piensa que, que queda la...?	
	16	E: Mira, así te la voy a poner fácil: cualquier gobierno municipal, y de acuerdo es una, es algo	
	17	establecido en la constitución, el servicio público está considerado como en primer lugar; y	
	18	está lo que es servicios públicos y seguridad pública, en primer lugar.	
	19	I: (pausa 3 segundos) Ah... ok... (en voz baja) (pausa 3 segundos)	
	20	I: ¿Conoce de acciones que se estén tomando para resolver la problemática de los residuos?	
	21	E: ¡Sí!, hay...está contemplado dentro de las líneas de acción, dentro del plan municipal de	
	22	desarrollo de Ensenada 2008-2010, como una de las líneas de acción de prioridad, en cuanto	
	23	al manejo de los residuos sólidos. Inclusive se está considerando llegar al reciclaje, de la	
	24	basura, ¿no?, se está considerando independientemente de las rutas que se llevan en la	
	25	recolección de basura, se está considerando los centros de acopio, como son los aaa...	
	26	centros o unidades de transferencia para agilizar y dar un mayor y mejor servicio, a la	
	27	comunidad Ensenadense.	
	28	I: Entonces están pensando en reciclaje...	
	29	E: Así es...	

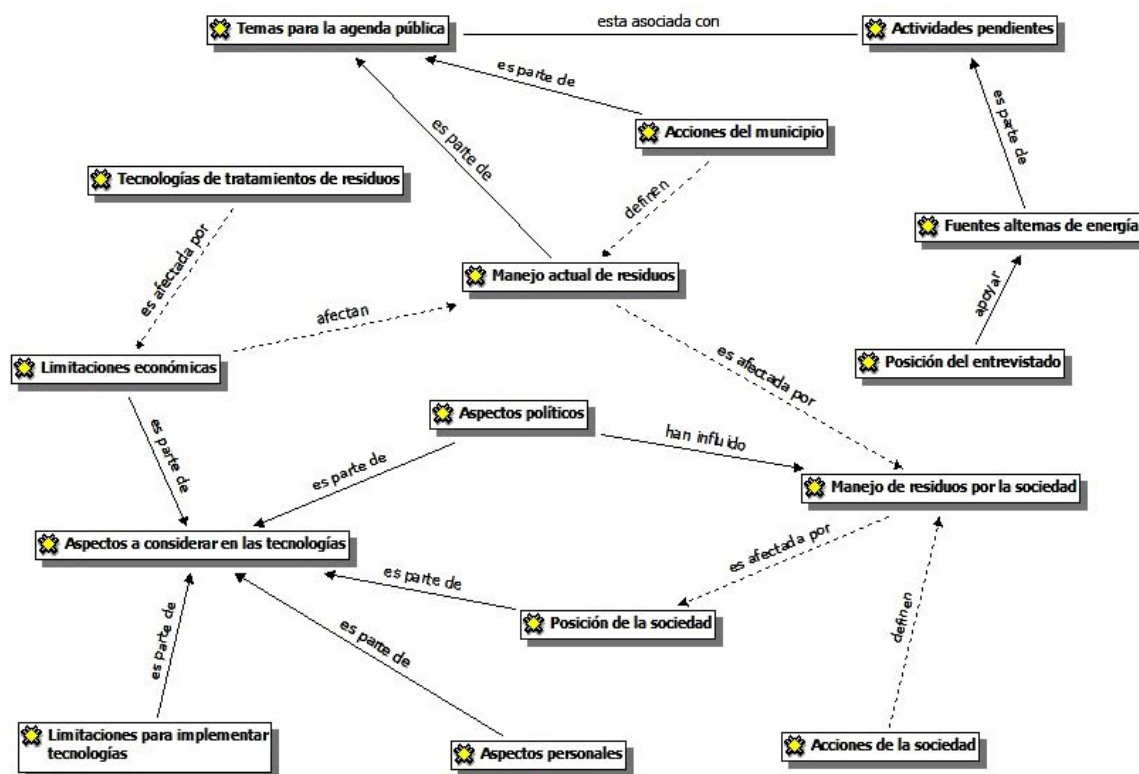


Figura 4-1. Red de relaciones entre categorías

4.4. Entrevistas a la sociedad

En la Figura 4-2 se presentan los resultados obtenidos en las entrevistas realizadas. El índice cero indica una condición de desacuerdo, mientras que el índice 4 indica un total acuerdo. Los número entre paréntesis en las aristas del radar, corresponden al número de pregunta de acuerdo con la siguiente lista: (1) considerar que la basura es un problema muy importante en su comunidad; (2) que el manejo de la basura es responsabilidad solamente del municipio; (3) considerar que la basura es un problema para el ambiente (aire, tierra, suelo); (4) ya que se llevan la basura de su casa, esta no representa problemas para el ambiente; (5) que una buena forma de eliminar la basura es quemándola; (6) confianza en las decisiones del gobierno respecto a la instalación de equipos como gasificadores, digestores o plasma; (7) preferencia en que su basura se utilice para hacer composta en vez de tratarla con gasificadores, digestores o plasma; y (8)



considerar que es importante que se empiecen a utilizar equipos para tratar la basura y generar energía.

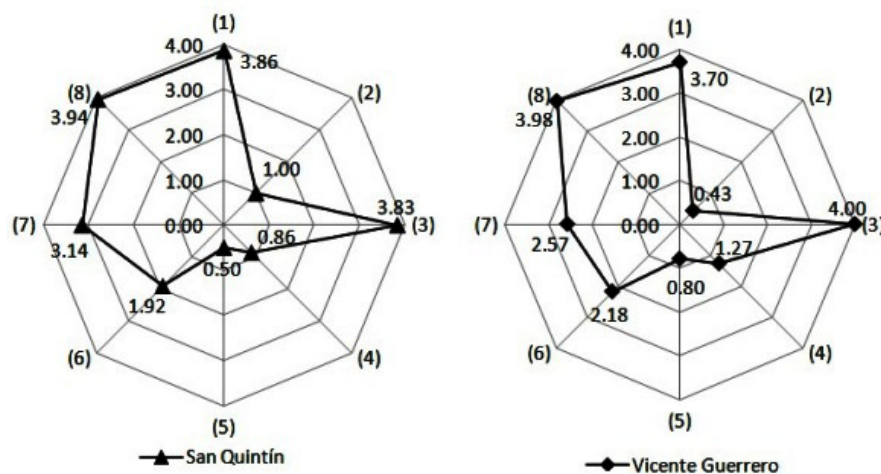


Figura 4-2. Radar sobre aspectos del manejo de residuos.

En la Figura 4-3 se presentan los porcentajes de las respuestas afirmativas que se obtuvieron sobre la posición que tienen los residentes respecto al reciclaje y tratamientos de residuos con recuperación de energía.

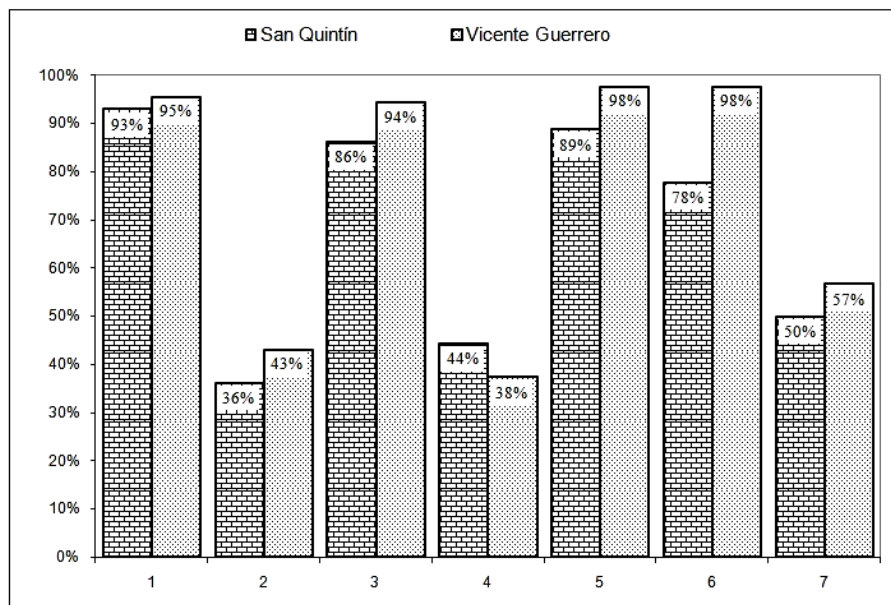


Figura 4-3. Posición de los residentes sobre reciclaje y tratamientos.



Los números en el eje x de la Figura 4-3 corresponden al número de pregunta de acuerdo con la siguiente lista: (1) ¿consideras importante el reciclaje?; (2) ¿reciclas algún material?; (3) si te solicitara el municipio que separaras tu basura para reciclarla, ¿lo harías?; (4) en la actualidad, ¿te preocupa lo que pasa con tu basura después de que se la llevan de tu casa?; (5) ¿apoyarías la instalación de digestores para aprovechar la basura que recolectan los camiones de basura?; (6) ¿apoyarías la instalación de gasificadores para aprovechar la basura que recolectan los camiones de basura?; (7) ¿apoyarías la instalación de incineradores de plasma para aprovechar la basura que recolectan los camiones de basura?

De los tratamientos propuestos, se puede apreciar que existe una alta aceptación a la instalación de digestores; decrece ligeramente en los gasificadores y se reduce sustancialmente en la gasificación por plasma. No obstante, entre el 64% y el 74% de los residentes prefieren que se elabore composta con sus residuos en vez de darle otro tipo de tratamiento.

La oposición a la incineración por plasma por parte de los respondientes resulta paradójica. Entre los argumentos mencionados para adoptar esta postura, señalaron que al incinerar los residuos se pierde toda oportunidad de aprovechar materiales valiosos y reintegrar a la naturaleza los nutrientes de los residuos orgánicos. Sin embargo, en observaciones realizadas durante recorridos por la zona, se apreció que los residuos de jardinería, periódicos y cartones de empaques eran incinerados en el traspatio de las casas. Por otro lado, los residuos que están siendo recolectados por el municipio están siendo incinerados a cielo abierto cada tercer día en el vertedero de cada comunidad. De ambas situaciones los residentes están enterados y coexisten con ello.



4.5. Análisis AHP

La puntuación obtenida por cada tecnología en cada criterio se muestra en la Tabla 4-7. La puntuación de la decisión de una alternativa es la suma de la puntuación (rating) de esa alternativa con respecto a cada uno de los criterios (atributo) más bajos ponderados por la importancia de cada criterio en el modelo. Cuanto mayor sea la puntuación de la decisión de la alternativa, más probable es que la alternativa satisface todos los criterios en la decisión (InfoHarvest Inc, 2002). Los resultados en forma gráfica se muestran en la Figura 4-4.

Tabla 4-7. Puntuación de decisión del modelo

Objetivo	Prioridad	Criterios	Nivel 2	Prioridad	Nivel 3	Prioridad			
						Incinerador de plasma	Biodigestor etapa simple	Gasificador Downdraft	Modelo
Selección de tecnologías	0.180	Social	Social	0.800	Generación de empleos	0.130	0.652	0.217	0.144
	0.060	Ambiental		0.200	Aprobación de la sociedad	0.067	0.467	0.467	0.036
	0.480	Político	Ambiental	0.333	Contaminación de suelo	0.038	0.192	0.769	0.020
	0.240	Económico		0.333	Contaminación de aire	0.094	0.755	0.151	0.020
	0.040	Insumos		0.333	Contaminación de agua	0.038	0.192	0.769	0.020
			Político	0.111	Aprobación de los tomadores de decisiones	0.069	0.621	0.31	0.053
				0.889	Aspectos legislativos y normativos	0.087	0.783	0.13	0.427
			Económico	0.800	Costos de instalación	0.13	0.652	0.217	0.192
				0.133	Costos de operación	0.069	0.621	0.31	0.032
				0.067	Mercado para productos y subproductos	0.828	0.138	0.034	0.016
			Insumos	0.500	Cantidad generada	0.828	0.138	0.034	0.020
				0.500	Tipo de residuo	0.828	0.138	0.034	0.020
					Resultado	0.139	0.653	0.208	1.000

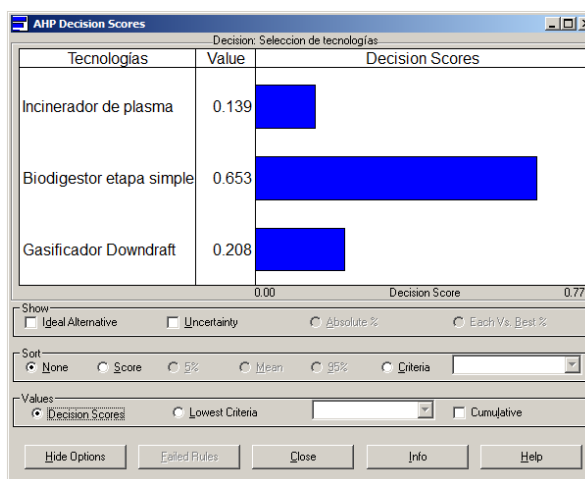


Figura 4-4. Resultados de decisión



Se puede apreciar en la Figura 4-4 que el digestor tiene una puntuación muy elevada respecto a las otras tecnologías, indicando que es la tecnología a seleccionar de acuerdo a los criterios, juicios y evaluaciones realizadas previamente en el modelo. Las contribuciones de cada criterio en la ponderación final de cada tecnología se pueden conocer en la Figura 4-5.

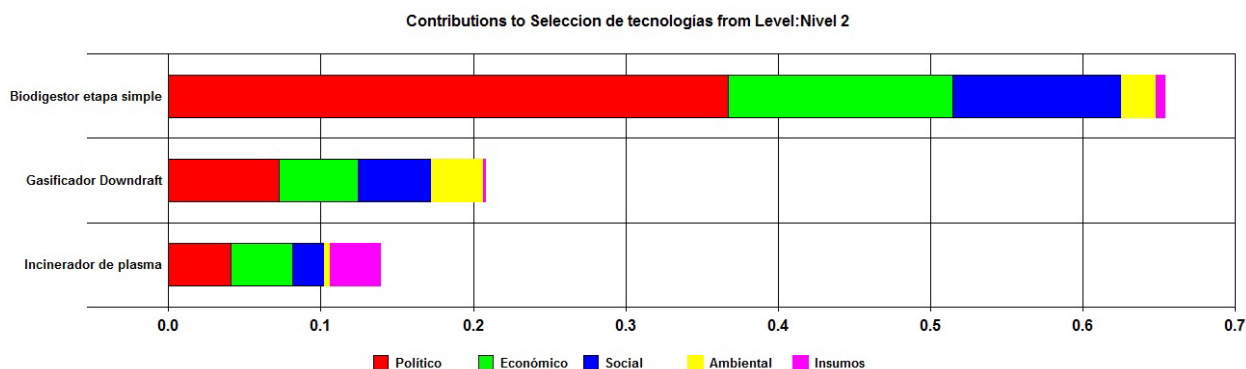


Figura 4-5. Contribución a nivel 2

En la Figura 4-6 se puede apreciar como contribuyen los subcriterios en la selección tecnológica. Sólo aparecen cuatro subcriterios porque el CDP presenta unicamente los principales (hasta seis) y el resto lo agrupa en un solo criterio (otros).

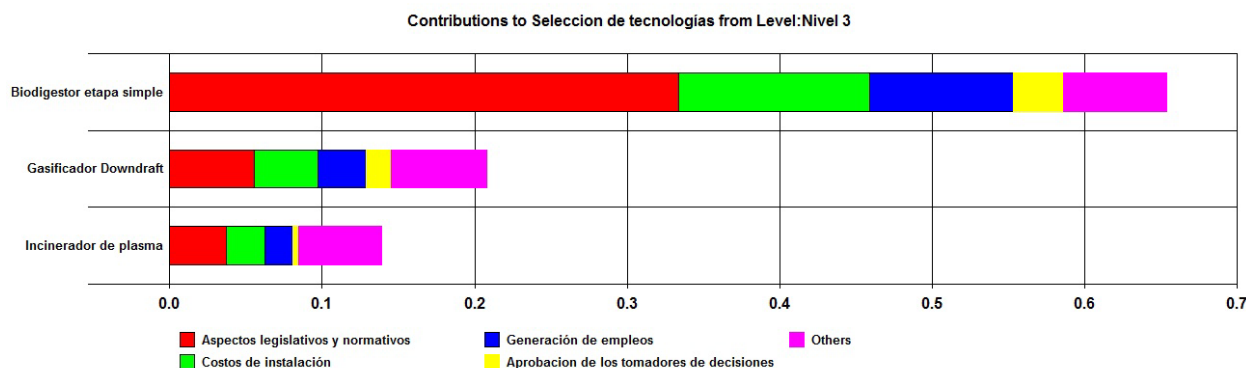


Figura 4-6. Contribución a nivel 3

InfoHarvest Inc (2002) indica que un modelo es estable a cambios en todas las otras prioridades del modelo completo cuando el porcentaje de cruce de la prioridad más crítica es mayor a 5%. El resultado del análisis de sensibilidad muestra que la prioridad con mayor



sensibilidad es Insumos, con un 41% para el valor de cruzado (crossover). Por tanto, se concluye que el modelo es estable.

El análisis de sensibilidad del criterio Insumos se presenta en la Figura 4-7. Se observa que con el valor actual del criterio en el proceso (de 0.04), el digestor es la tecnología indicada. Si el valor de este criterio cambiara hasta llegar al valor de 0.45, que representaría un cambio extremadamente drástico, se llegaría al punto de cruce (crossover). Después de este valor, el gasificador de plasma sería la tecnología indicada para tratar los residuos en las comunidades.

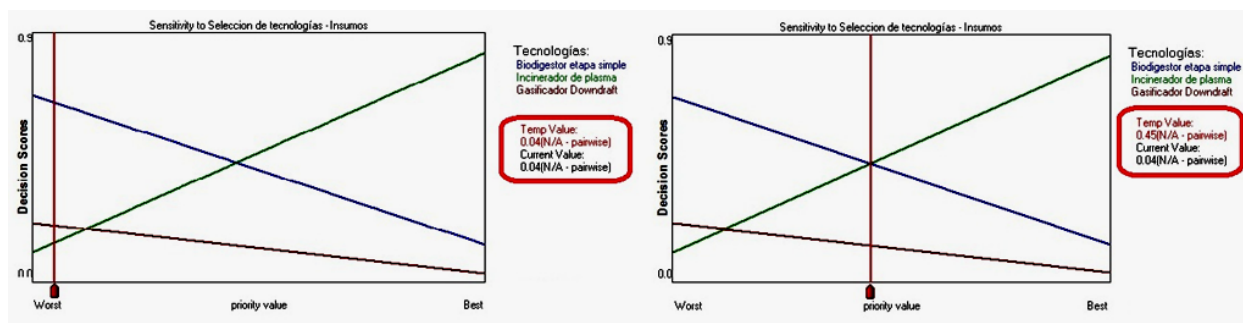


Figura 4-7. Análisis de sensibilidad, criterio: Insumos

5. DISCUSIÓN

5.1. Residuos sólidos

5.1.1. Manejo de residuos en las comunidades

El rezago en la recolección de RS en ambas comunidades pudo ser el producto de la falta de presupuesto y planificación en las rutas. En el estudio se observó que el personal con el que se cuenta para realizar las labores de recolección es reducido, por lo que algunos camiones en San Quintín solo realizan un viaje al día. Arenas (2008) comentó que en las especificaciones de los camiones se indica que pueden cargar hasta 6 toneladas a capacidad máxima. En la semana de estudio de enero, el 75% de los camiones recolectó menos de 4.5 toneladas por viaje; en junio fue de 52%, lo que indica que los camiones se están cargando por debajo de su capacidad máxima.

El sistema de recolección puede mejorar y ampliar el servicio si se comienza a cobrar el servicio y destinar estos recursos para la contratación de personal y mantenimiento de las unidades. El 67% de los habitantes entrevistados afirmó dar propina por el servicio. De este porcentaje, el 65% da propinas entre los \$10-30 pesos, el 29% entre \$30-50 pesos y el 6% cantidades superiores a los \$50 pesos. El INE (2001) expone que en la mayoría de los municipios mexicanos no se cobra por el servicio de recolección a través de la administración municipal, sin embargo, gran parte de la ciudadanía paga propinas o gratificaciones que en algunos casos sobrepasan la cantidad que costaría un servicio formal por parte del municipio.



5.1.2. Generación de residuos

Las estimaciones de la GPC determinadas en este estudio pueden ser superiores. Esto se debe a que la generación se calculó con base en los residuos recolectados por el municipio y, como es sabido, la cobertura de los sistemas no es al 100%, por lo que existe un remanente que no es contabilizado. El Gobierno Municipal de Ensenada (2007) indicó que la cobertura en zonas rurales en el 2007 fue del 60%. El INE (1999) señala que la cobertura en población servida promedio a nivel nacional se estima en 78%. Para las zonas metropolitanas se ha calculado en 95%, mientras que para ciudades medias entre el 70 y 85%. En áreas urbanas pequeñas se ubica entre el 50 y 70%.

A pesar de estar separadas geográficamente por 25 Km aproximadamente, los niveles de GPC de RS presentan una sustancial variación, correspondiendo la mayor generación a la comunidad Vicente Guerrero.

La GPC estimada para la población de San Quintín oscila entre 0.631- 0.732 kg/día. Este valor es muy similar a la media propuesta por SEDESOL (2006) de 0.697 kg para la zona Sur del país. Este comportamiento puede presentarse porque en San Quintín se concentra una importante población inmigrante proveniente principalmente de estados del sur como Oaxaca, Guerrero, Puebla y Chiapas.

La estimación de la GPC en Vicente Guerrero se hizo por seis procedimientos diferentes. Las observaciones sobre cada procedimiento se exponen a continuación.

- Estimación por similitud. El valor determinado para Vicente Guerrero por este procedimiento (0.934 kg/día) es muy próximo al reportado por SEDESOL (2006) de 0.911 kg/día por habitante en México. No obstante, el volumen generado se infirió con base en el



criterio del investigador y no en un procedimiento estandarizado, lo que afecta la replicabilidad.

- Estimación con peso específico propuesto por Tchobanoglous. El peso específico típico que proponen Tchobanoglous et al. (1994) -de 297 kg/m^3 - sobreestima la generación per cápita de residuos para una zona rural significativamente. Con base en los RS generados en San Quintín en el estudio en enero, se observó que sobrestimó la generación per cápita diaria en 0.155 kg , que representa un 24.5% del valor determinado por peso/habitantes. No obstante, los datos de recolección en la ciudad de Ensenada en el mismo periodo de estudio arrojaron un peso específico semanal con una media de 298.29 kg/m^3 y una desviación estándar de 25.4 kg/m^3 , para un intervalo de confianza del 98% , aplicando el estadístico t-student.
- Estimación con peso específico propuesto por Jiménez. El peso específico típico que propone Jiménez (2002) de 250 kg/m^3 - sobreestima la generación per cápita de residuos ligeramente. Considerando los RS generados en San Quintín en el estudio en enero, se observó que sobrestimó la generación per cápita diaria en 0.031 kg , que representa un 4.91% del valor determinado por peso/habitantes. Este valor es una buena aproximación al valor real.
- Estimación con peso específico en camiones de San Quintín. El valor de GPC obtenido por este procedimiento (1.081 kg/día) es muy próximo al reportado por SEDESOL (2006) para la frontera norte de México (1.048 kg/día). El peso específico empleado para la determinación (228.79 kg/m^3) es próximo al encontrado por Hristovski et al. (2007) en otro estudio similar (223 kg/m^3).
- Estimación con peso específico y factor de compactación in situ. El valor de GPC obtenido por este procedimiento (1.047 kg/día) es prácticamente igual a lo reportado por SEDESOL (2006) para la frontera norte de México (1.048 kg/día). Una observación en la aplicación de este procedimiento en otros sitios sería que el factor de compensación que se



seleccione (que puede oscilar entre 1.70-2.00) estaría determinado por el criterio del investigador.

- Estimación con peso específico in situ y compactación del 50%. El factor de compensación empleado se determinó con base en la razón de reducción de volumen expuesta por SEDESOL (2006). El valor de GPC obtenido por este procedimiento (1.185 kg/día) es superior 0.137 kg/día a lo reportado por SEDESOL (2006) para la frontera norte de México (1.048 kg/día). Se observa que para San Quintín se sobrestima la GPC diaria en 0.083 kg, que representa un 13.2% del valor determinado por peso/habitantes. Esta variación es menor en un 11.3% respecto a lo estimado con el valor típico propuesto por Tchobanoglous et al. (1994).

5.1.3. Composición de residuos

La fracción de textiles en ambas comunidades fue muy elevada con respecto al 1% propuesto para la media nacional (SEMARNAT, 2008; Gutiérrez, 2006; Jiménez, 2002). Sin embargo es similar a lo indicado por Tchobanoglous et al. (1994) para países de mediano ingreso, y a los hallazgos en estudios realizados en la ciudad de Mexicali (Ojeda, 2006; Ojeda, 2005). Una posible explicación de este comportamiento sería que en estas comunidades es común la venta de ropa de segunda, la cual por su calidad y bajo costo, es más probable que se adquiera y deseche de forma más rápida.

En San Quintín, del total de residuos, solo el 12.48% se puede considerar como no reciclable. El 43.5% puede ser reciclable y el 44.02% puede ser empleado como materia prima en tratamientos de residuos con recuperación de energía. Esto demuestra que un alto porcentaje de los residuos generados en la comunidad pueden ser reciclados o transformados a energía, quedando solo un porcentaje reducido para ser depositados en los vertederos. En Vicente Guerrero solo el 18.1% de los residuos generados no puede considerarse para reciclaje. El 44.37% es



susceptible a reciclaje y el 37.53% puede ser empleado para generar energía mediante tratamientos de residuos con recuperación de energía. Se observa entonces que, de implementarse tratamientos para los residuos, solo un porcentaje pequeño terminaría en el relleno sanitario.

5.1.4. Análisis estadístico

Se observa que en San Quintín el P-value de residuos alimenticios y de madera-residuos de jardinería, son inferiores al nivel de significancia. Se concluye entonces que sí existe diferencia significativa en la generación de RS entre temporadas en esta comunidad. En un nuevo análisis, los P-value encontrados fueron 0.999 para residuos alimenticios (indicando que existe una mayor generación en invierno) y 0.000 para madera-residuos de jardinería (indicando una mayor generación en verano).

El incremento de residuos alimenticios en invierno puede ser consecuencia de las fiestas decembrinas y un mayor poder adquisitivo de los residentes debido al ingreso económico extraordinario por la prestación laboral "aguinaldo". Respecto a la fracción madera-residuos de jardín, su incremento en verano puede deberse a la poda de árboles y plantas de ornato como consecuencia del crecimiento provocado por las lluvias de invierno.

En Vicente Guerrero, sólo la fracción madera-residuos de jardinería presenta diferencia significativa entre las dos temporadas. El P-value del nuevo análisis es de 0.008, indicando que se generan más residuos de este tipo en verano que en invierno. Este comportamiento puede obedecer a la misma causa expuesta para San Quintín.

En los P-value de la comparación entre ambas comunidades se puede observar que existe diferencia significativa en el cartón y madera-residuos de jardinería. En un segundo análisis se



obtiene un P-value de 0.995 para el primer componente y de 0.000 para el segundo. Estos valores indican que en San Quintín se desecha más cartón que en Vicente Guerrero y que en este último se desechan más residuos de madera-residuos de jardín.

La menor presencia de cartón en los residuos de Vicente Guerrero puede deberse a que las compañías recicladoras en estas comunidades sí compran el cartón, por lo que parte de lo generado se desvía del flujo de residuos. Respecto a la mayor generación de residuos de jardinería, esto puede ser consecuencia de una mayor población económicamente activa. En el estudio de Ojeda (2005) se observa que este tipo de residuos se incrementa conforme aumenta el ingreso económico.

5.2. Entrevista a actores clave

Las inversiones municipales en el manejo de residuos se hacen principalmente en la parte de recolección, con la adquisición de camiones recolectores. Informantes clave mencionaron que el gobierno invierte en aquello que pueda ser visto por las personas, como los camiones, debido a que políticamente es más redituable. Se indicó que los efectos de una inversión en un relleno sanitario no son visibles por la sociedad, mientras que leer en el periódico sobre la compra de nuevos camiones da la sensación de respuesta al problema de los residuos. De esto se puede concluir que es necesario que se realicen más estudios y campañas publicitarias que enfatizen la importancia de un manejo integral y apoyen la toma de decisiones.

Se indicó que las políticas de inversión en manejo de residuos sólidos las maneja el estado y la baja a los municipios, y que no hay partidas especiales para el tratamiento de los residuos. Por ello, la asignación de partidas específicas para dar tratamiento y valorizar los residuos en México, es un tema al que se debe de dar prioridad para garantizar la preservación del medio ambiente.



En el tema de valorización de materiales para lograr la sustentabilidad, el municipio busca promover la cultura de reciclaje en la sociedad. Sin embargo falta crear la infraestructura para concretar este objetivo. No existe equipo para hacer recolección separada ni separación en los centros de acopio por parte del municipio. Se han realizado pruebas piloto de reciclaje por parte del municipio, pero la falta de mercados para colocar los materiales secundarios impidieron continuar con los proyectos. Ojeda-Benítez et al. (2003) exponen que para desarrollar un programa de recuperación de materiales reciclables es necesario tener compañías receptoras u organizaciones que se hagan cargo de recibir y procesar los residuos separados previamente.

Los actores clave expresan que la sociedad juega un papel muy importante en operación del sistema en general. Sin embargo existe poca conciencia de parte de esta sobre la necesidad de disminuir la generación y manejar apropiadamente los residuos. Indican que lo que la sociedad busca es deshacerse de sus residuos y que desaparezcan lo más lejos posible del hogar (no en mi patio trasero-NIMBY). Una medida que el gobierno ha tomado al respecto es colocar spots en los diferentes medios para promover la reducción de residuos y fomentar programas de reciclaje en las primarias, sin embargo no se tienen datos sobre la efectividad de estas actividades. La falta de interés en el manejo de los RS por parte de la sociedad requiere de mayor estudio para comprender el fenómeno y realizar acciones para mejorar.

La falta de recursos de muchos municipios en México (en términos de personal, presupuesto y equipamiento) resulta en una incapacidad para resolver el problema de manejo de los residuos (Bernache, 2006). Esta situación es conocida por los actores clave, quienes mencionaron que el gobierno ha realizado diversas acciones para tratar de subsanar el problema de la mala disposición de residuos, tal como clausura de vertederos clandestinos, pero la falta de cultura de las personas y las limitaciones económicas para desarrollar una investigación que permita encontrar a los responsables del hecho y sancionarlos, provoca que el problema continúe.



Sobre la metodología empleada en este estudio, se puede expresar que cuando se realice un estudio con características similares, se preste especial atención a las etapas de categorización y creación de significados porque son las que consumen gran parte del tiempo total del estudio. Esto sucede porque las categorizaciones se deben de hacer con cautela, considerando las posibles subcategorías y relaciones, lo que lleva a leer con paciencia cada documento en más de una ocasión. En la creación de significados, se requiere de mayor atención puesto que se tienen que considerar todos los documentos y el contexto en que fueron creados. Se sugiere el uso de software en esta etapa para facilitar el proceso.

5.3. Percepción de la sociedad

En ambas comunidades los residentes consideran que los RS constituyen un problema muy importante en su comunidad y reconocen que generan problemas para el ambiente y riesgos a la salud, como se aprecia en la Figura 4-2, índices 1 y 3. No obstante, les interesa poco lo que sucede con sus residuos una vez que desaparecen de su vista como puede apreciarse en el índice 4 de la misma figura. Esa actitud de indiferencia puede deberse a que los residentes consideran que los efectos negativos de los residuos desaparecen al ser recolectados por el municipio. Esta percepción fue más aceptada en San Quintín que en Vicente Guerrero. Ohman et al. (2007) en un estudio sobre localización de rellenos sanitarios, encontraron que cuando la distancia es de más de un kilómetro de la comunidad más cercana, la salud, la seguridad y las cuestiones ambientales llegan a ser una preocupación menor que cuando el relleno sanitario está más cerca.

La idea de que el manejo de la basura es responsabilidad solamente del municipio es mayormente aceptada por los residentes de San Quintín que por los de Vicente Guerrero (índice 2, Figura 4-2), aunque en general los residentes están en desacuerdo con esta aseveración. Esta situación contrasta con lo encontrado por Cota (2004) en la ciudad de Ensenada, donde el 81% de



los respondientes (valor de 3.24, determinado por interpolación) consideraron que esta actividad es responsabilidad exclusiva del municipio.

La actitud de corresponsabilidad en el manejo de los RS que manifiestan los residentes de estas comunidades es una ventaja que puede ser aprovechada por las autoridades pertinentes para la implementar programas de mejora. Durante el estudio, algunos residentes señalaron que la sociedad debe participar más en temas como reciclaje y reutilización. Bernache et al. (1998) señalan que la participación de la sociedad local en la gestión del servicio público es importante y que hasta ahora las demandas ciudadanas se refieren a la regularidad del sistema de recolección domiciliaria, pero en un futuro podrían estar más enfocadas a la segunda parte del servicio municipal: los programas de tratamiento y la estrategia de disposición final de residuos sólidos municipales.

En lo referente a considerar la incineración como una buena medida para deshacerse de sus residuos, la mayoría de los residentes de ambas comunidades se mostraron en desacuerdo (índice 5, Figura 4-2). Este punto resulta especialmente importante para analizar a profundidad, porque los residentes permiten que se quemen los RS del vertedero, a pesar de que conocen los riesgos que conlleva la incineración y saber que está prohibida por ley.

Las dos comunidades mantienen una opinión dividida (neutral) sobre su confianza en las decisiones que toma el gobierno sobre la adquisición de infraestructura para el manejo de los residuos (índice 6, Figura 4-2). Una razón que mencionaron los residentes en desacuerdo, es que el gobierno no informa adecuadamente sobre sus decisiones y esto les genera desconfianza.

En estas comunidades, el grado de preferencia del composteo sobre la biodigestión, gasificación descendente y gasificación por plasma (índice 7, Figura 4-2), difiere notablemente.



Mientras que en San Quintín los residentes se inclinan por este tratamiento, en Vicente Guerrero la opinión está dividida. Esta diferencia pudiera residir en que los residentes de Vicente Guerrero, al tener un mejor poder adquisitivo, tengan acceso a información (TV, revistas) sobre la aplicación de estas tecnologías y las consideren adecuadas.

Sobre las tecnologías, se puede apreciar en la Figura 4-3 que existe una alta aceptación a la instalación de digestores (índice 5), decrece ligeramente en los gasificadores (índice 6) y se reduce sustancialmente en la gasificación por plasma (índice 7). La oposición a los tratamientos térmicos por parte de los respondientes resulta paradójica. Entre los argumentos mencionados para adoptar esta postura, señalaron que al incinerar los residuos se pierde toda oportunidad de aprovechar materiales valiosos y reintegrar a la naturaleza los nutrientes de los residuos orgánicos. Sin embargo, en observaciones realizadas durante recorridos por la zona, se apreció que los residuos de jardinería, periódicos y cartones de empaques eran incinerados en el traspatio de las casas. Por otro lado, los residuos que están siendo recolectados por el municipio están siendo incinerados a cielo abierto cada tercer día en el vertedero de cada comunidad. De ambas situaciones los residentes están enterados y coexisten con ello.

Existe una total aceptación de los residentes sobre la necesidad de aplicar tecnologías para tratar los residuos y recuperar energía. Aunque no se tienen datos concluyentes, tal respuesta pudiera deberse a la problemática que se vive en comunidades rurales, donde la eficiencia de los servicios sanitarios y la continuidad en el suministro eléctrico constituyen importantes retos a vencer.

El porcentaje de encuestados que realizan reciclaje de algún material fue de 36% en San Quintín y de 44% en Vicente Guerrero. El principal motivo para realizar esta actividad es la



obtención de ingresos económicos extra, más que por una actitud de preservación ambiental. Los materiales reciclados son: aluminio, PET, vidrio, material ferroso y material orgánico.

Aunque en la actualidad resulte impráctico realizar recolección separada en estas comunidades (por falta de tratamientos adecuados, equipos de recolección y recursos económicos), el 86% de los respondientes en San Quintín y el 94% de Vicente Guerrero estarían dispuestos a separar sus residuos para que el municipio los reciclara si este lo solicitara. En este tema, es importante que el municipio ponga en marcha un programa de recolección separada si no tiene los recursos necesarios para mantenerlo o mercado para los materiales recuperados, ya que esto provoca la caída del interés de las personas para separar sus residuos. Guerrero (2004) señala que en la ciudad de Ensenada la falta de aplicación del reglamento municipal de limpia, la falta de voluntad política, presupuesto y la adquisición de equipos, provoca que solo el 23% de los residentes separen sus residuos.

5.4. Análisis de la evaluación tecnológica

Al inicio de este estudio se desconocía qué factor(es) impide(n) o favorece(n) la puesta en marcha de tecnologías de tratamiento de RS con recuperación de energía. Con base en los resultados de la Figura 4-6, se puede afirmar que los aspectos legislativos y normativos (criterios políticos) constituyen el principal aspecto a considerar en la selección de una tecnología, más que la factibilidad técnica o económica. Un hallazgo similar fue reportado por Ohman et al. (2007) en un estudio sobre localización de rellenos sanitarios aplicando AHP. Ellos encontraron que los aspectos legislativos son vinculados fundamentalmente a la salud, la seguridad y las preocupaciones ambientales.



Quintanilla (1999) desarrolló un SET para uso de energías renovables (eólico y solar) en la región de San Quintín y sus resultados indicaron que los criterios preponderantes en la instalación de una planta de energía eléctrica son: criterios económicos, criterios políticos, criterios tecnológicos, criterios sociales y criterios ambientales. Los hallazgos de este estudio difieren con los de Quintanilla (1999) solamente en el orden de importancia de los dos primeros criterios, siendo en este estudio el criterio político el primero y el criterio económico el segundo. Esta diferencia puede radicar en: a) la distribución política en México (Senado, Cámara de diputados, Gobiernos federales, estatales y municipales) ha cambiado desde entonces, actualmente todas las obras públicas constituyen mercancía política para las campañas; b) cuando Quintanilla desarrolló su estudio las condiciones económicas en México eran distintas a las actuales. En ese tiempo (finales de los 90's), el país se estaba recuperando de una fuerte devaluación económica y en consecuencia, es entendible que el aspecto económico haya sido la principal restricción en cualquier proyecto a realizar por los tres ordenes de gobierno.

Llama la atención el hecho de que el aspecto ambiental ha permanecido como un criterio de peso menor para los tomadores de decisiones, por debajo del aspecto social. Esto puede explicar parte de los problemas ambientales que vive el país y que se agravan conforme pasa el tiempo. Sin embargo, a pesar del poco peso que los tomadores de decisiones le dan a los criterios ambientales, indirectamente se están realizando acciones para subsanar esta falta de conciencia. Por aspectos políticos, México ha firmado una serie de tratados como el Convenio de Basilea, Convenio de Estocolmo o el Protocolo de Kioto, y en consecuencia ha tenido que crear leyes (Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, entre otras) para cumplir con tales acuerdos.



Si bien el conocimiento de los residentes sobre las tecnologías son escasos o nulos, existen aspectos que consideran importantes como el costo o la generación de empleos, que pueden hacer la diferencia en la selección. Esto se vio reflejado en el AHP (ver Figura 4-6) donde se pudo apreciar que estos rubros se colocaron entre los primeros tres subcriterios con mayor contribución en la selección tecnológica.

Aunque las preguntas de aprobación de las tecnologías aplicadas a la comunidad se elaboraron tratando de evitar un sesgo (ver 3.5.1), no se tiene la certeza de la influencia que esto pudo ocasionar en la selección tecnológica. Por las condiciones de aleatoriedad de la muestra y el limitado presupuesto para la investigación, no fue posible realizar un estudio posterior para una nueva evaluación después de haberles impartido un taller o conferencia.

La tecnología seleccionada en este estudio puede ser operada fácilmente por los residentes de las comunidades ya que no requiere herramientas muy sofisticadas. Las necesidades en el mantenimiento pueden crear empleos locales y el desarrollo de nuevos proyectos de negocios. Además, con el apoyo de las autoridades, se pueden hacer las gestiones necesarias para integrar el proyecto al Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM) y obtener recursos para el mantenimiento o creación de nuevos proyectos.

5.5. Aplicación del AHP

Las recientes crisis financieras a nivel mundial y los problemas ambientales producidos por decisiones tomadas en el pasado, exigen mayor claridad, fundamentación y análisis en las decisiones del gobierno. Diversos autores (Stasinopoulos et al., 2009; Howlett, 2009; Clayton et al., 1996) han demostrado que los problemas relacionados con el desarrollo sustentable pueden ser clasificados como complejos, por lo que existe la necesidad de abordarlos desde una



perspectiva holística. Schmoldt et al. (2001) indican que han quedado atrás los días cuando las decisiones sobre los recursos naturales podrían estar basadas en un indicador único (criterio), por ejemplo, Valor Presente Neto (VPN).

En este estudio, el AHP demostró ser una herramienta adecuada para seleccionar tratamientos de residuos bajo enfoque de sistemas complejos y apoyar la toma de decisiones. El proceso de normalización permitió que los aspectos subjetivos y cuantitativos, que se miden en diferentes escalas, pudieran ser evaluados en situación de igualdad. Lotfi y Solaimani (2009) indican que el uso de AHP crea la oportunidad de involucrar los diferentes puntos de vista de los usuarios urbanos respecto a sus derechos y funciones en la etapa de ponderación de los criterios.

La sustentabilidad se logra cuando existe un equilibrio entre los aspectos sociales, económicos y ambientales. Si los tomadores de decisiones o su equipo de apoyo emplean herramientas que sólo consideran un aspecto de esta terna, las decisiones que se deriven de ellas no conducirán a la sustentabilidad. Por ello es importante emplear herramientas multicriterio como AHP.

En un esfuerzo por presentar alternativas para apoyar la toma de decisiones y reducir los efectos adversos provocados al ambiente por los RS, investigadores a nivel mundial han empleado el AHP en fases del manejo de RS como prevención y disposición final (Wang et al., 2009; Ohman et al., 2007; Moeinaddini et al., 2010; Contreras et al., 2008; Ramjeawon y Beerachee, 2008). Los objetivos, metodologías, criterios y subcriterios empleados en tales investigaciones difieren con los de este estudio, por lo que no pueden ser comparables *stricto sensu*. Sin embargo, constituyen una fuente de ideas y comparación para nuevas evaluaciones.



La presentación de las contribuciones en forma gráfica permite visualizar de manera más rápida los criterios y subcriterios dominantes en la decisión. Bell y Morse (2008) indican que las autoridades y tomadores de decisiones requieren una presentación simple y clara, más que modelos científicos.

La sensibilidad de los resultados de este estudio es baja, por lo que proponer escenarios alternos es innecesario. Sin embargo, si la sensibilidad hubiera sido alta, la construcción de escenarios alternos con el software CDP sería relativamente fácil, solo bastaría con modificar la ponderación de los criterios y recalcular nuevamente los índices.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tres tecnologías de tratamiento de residuos con recuperación de energía fueron evaluadas considerando criterios sociales, políticos, económicos y ambientales. Con referencia en la literatura, comunicación personal con expertos, entrevistas y estudios de residuos, se construyó una red de jerarquía para evaluarla con la técnica Proceso de jerarquía Analítica (AHP).

Los resultados mostraron que el digestor de etapa simple es la tecnología indicada para el tratamiento de residuos en las comunidades San Quintín y Vicente Guerrero. El resultado del análisis de sensibilidad indica que es poco factible que cambie esta decisión, considerando las actuales condiciones sociales, políticas, económicas y ambientales.

La tecnología seleccionada en este estudio (digestor) no pretende sustituir por completo a los sitios de disposición (vertederos o rellenos sanitarios), sino más bien aprovechar el remanente energético en los residuos sólidos, recuperar los nutrientes y coadyuvar en la mitigación de sus efectos nocivos.

Aunque actualmente en México se están desarrollando proyectos con digestores en el sector pecuario, sería de gran importancia para el desarrollo de las comunidades rurales que se comenzaran a desarrollar proyectos similares empleando residuos sólidos domésticos. Países como India y China son ejemplo de éxito del aprovechamiento de sus residuos para mejorar las condiciones rurales e incrementar su competitividad y calidad de vida.



Cuando se usan los residuos sólidos como fuente de energía se pueden obtener beneficios económicos y ambientales, además de evitarle a los municipios los costos por disposición de residuos. Por ello, es necesario que las autoridades municipales comiencen a gestionar recursos para la aplicación de tecnologías para el tratamiento de residuos con recuperación de energía y presenten iniciativas para asignar una partida económica específica para el manejo y tratamiento de los RSM, así como la tienen seguridad pública, infraestructura, partidos políticos, dependencias gubernamentales, por mencionar algunos.

Por su parte, las instituciones educativas deben continuar con el proceso de investigación sobre tecnologías sustentables en México para desarrollar equipos acordes a las necesidades y condiciones imperantes localmente, crear especialistas y mano de obra calificada, así como abaratar los costos de instalación y operación.

De manera paralela al desarrollo tecnológico, se debe trabajar en el desarrollo de estudios sociales, de salud y de impacto ambiental, entre otros, para ir creando las bases que permitan mejorar las condiciones de vida de los residentes de las comunidades rurales. Se requieren más estudios sobre RS para identificar los aspectos críticos e iniciar la gestión de recursos para crear una adecuada gestión integral de residuos sólidos.

Los hallazgos en este estudio indican que existe la necesidad de sensibilizar a los residentes de las comunidades rurales sobre el manejo adecuado de sus RS para evitar una mayor degradación ambiental en estas zonas. Una parte de los entrevistados en este estudio manifestaron su voluntad para comenzar a trabajar en los problemas que los afectan, pero requieren que las instituciones educativas o las autoridades sanitarias municipales se acerquen a ellos y los guíen en el proceso. Por tanto, se puede iniciar la sensibilización de los residentes



exponiendo estudios de caso a grupos de personas líderes en cada comunidad, para que ellos puedan iniciar y coordinar programas que busquen la preservación del ambiente.

El siguiente paso al proceso de sensibilización en las comunidades sería implementar programas sobre reciclaje, reducción y aprovechamiento de residuos para mejorar la economía familiar. Se pueden elaborar pequeños proyectos ejecutivos para el desarrollo de tecnologías, considerando: a) una importante participación de la comunidad, b) beneficios tangibles y/o evidentes para las comunidades, c) la pertinencia de acuerdo a las condiciones locales. Conforme se vayan concluyendo dichos proyectos, la sociedad tendrá más conocimiento y experiencia, por lo que podrá dirigir sus esfuerzos para preservar sus recursos y el ambiente de manera más efectiva.

El trabajo concurrente entre gobierno, sociedad y sector académico, puede ayudar a llenar el vacío existente respecto información sobre la generación de RS, definir compromisos y comenzar a trabajar en actividades sustantivas que permitan consolidar el sistema de gestión de residuos. Los municipios por si solos han tenido dificultad para hacer frente a la problemática provocada por la generación de RS. Al integrar a la sociedad y al sector académico, se suman esfuerzos y es más probable una coordinación de esfuerzos, recursos e información. Seguir actuando de forma independiente, como se hace actualmente, solo postergará el problema.

Respecto a la información sobre RS generada en este estudio, se concluye que la inexistencia de datos de generación y composición de residuos en la zona, impide la comparación de los datos generados en este estudio. Sin embargo, esta información puede servir de referencia para futuros estudios, lo que permitirá observar el comportamiento de la generación de residuos sobre el tiempo. La información obtenida pueden coadyuvar en la toma de decisiones sobre: a) programas de reducción de residuos; b) programas de estímulos para la creación de empresas recicladoras; c) programas de educación ambiental; d) optimización de equipo de recolección.



El procedimiento para determinar la generación de residuos afecta significativamente los resultados. Basarse en el sentido común o inferir con datos obtenidos bajo otros contextos (países, niveles socio-económicos, etc.), puede conducir a errores en la estimación y/o afectar seriamente la credibilidad de la información generada. Los eventos (días festivos, periodos vacacionales, el clima en la población, la estación del año) influyen en el volumen y composición de la generación, por lo que deben de considerarse cuando se realice un estudio.

Por los resultados obtenidos en este estudio, se considera que en caso de no poder pesar la carga de los vehículos de compactación en una zona rural, una buena aproximación se puede obtener por dos opciones: a) considerar un peso específico típico de 230 kg/m³ y determinar la generación; b) determinar el peso específico de los residuos y considerar un factor de ajuste del 57%.

Con referencia en la metodología empleada en el estudio cualitativo realizado, se puede concluir que las etapas de categorización y creación de significados son las que consumen gran parte del tiempo total del estudio. Esto sucede porque las categorizaciones se deben de hacer con cautela, considerando las posibles sub-categorías y relaciones, lo que lleva a leer con paciencia cada documento en más de una ocasión. En la creación de significados, se requiere de mayor atención puesto que se tienen que considerar todos los documentos y el contexto en que fueron creados. El apoyo en un software como Atlas.ti. ayuda a mejorar los tiempos de análisis porque a la vez que se realiza la categorización, se pueden observar relaciones y construir redes y significados.

Sobre la herramienta multicriterio empleada en este estudio (AHP) se puede decir que es una técnica de análisis que involucra numerosos cálculos y su complejidad se incrementa conforme lo hacen los criterios, subcriterios y opciones. La aplicación de un programa de cómputo como CDP facilita sustancialmente el proceso y permite que los nuevos análisis se realicen con



mayor rapidez, por lo que se recomienda que los tomadores de decisiones cuenten con este tipo de herramientas.

En el desarrollo de un análisis empleando AHP, la etapa que consume la mayor parte del tiempo es el proceso de recolección de la información necesaria para construir la jerarquía. Por ello, es muy importante identificar qué es lo que se va a buscar, donde se encuentran tales datos y como se va a documentar.

Para robustecer la decisión, es necesario que la ponderación de los criterios se soporte en documentos, videos, grabaciones u otro medio en la medida posible. Si un experto aporta su opinión, es recomendable que se transcriba en un procesador de texto para futuras revisiones o aclaraciones.

7. REFERENCIAS

- Abduli, M., 1995. Solid Waste Management in Tehran. *Waste Management Research* 13, 519-531.
- Adinyira, E., Oteng-Seifah, S., and Adjei-Kumi, T., 2007. A Review of Urban Sustainability Assessment Methodologies. In Glasgow.
- Arenas, V., 2008. Comunicación personal.
- Ayininuola, G. M., and Muibi, M. A., 2008. An engineering approach to solid waste collection system: Ibadan North as case study. *Waste Management* 28, 1681-1687.
- Banar, M., Cokaygil, Z., and Ozkan, A., 2009. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management* 29, 54-62.
- Batool, S. A., and Chuadhry, M. N., 2009. The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan. *Waste Management* 29, 63-69.
- Behar, M., 2007. The prophet of garbage. *Popular Science* 56, 56-61.
- Belgiorno V, De Feo G, Della Rocca C, and Napoli R. M.A, 2003. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management* 23, 1-15.
- Bell, S., and Morse, S., 2003. *Measuring Sustainability: Learning by Doing*. Earthscan Publications Ltd.
- Bell, S., and Morse, S., 2008. *Sustainability indicators*. Earthscan.
- Beltrán, E., 2009. Empresa choca genera biogás con excremento de ganado. *Milenio*.
- Bernache, G., Bazdresch, M., Cuéllar, J., and Moreno, F., 1998. *Basura y metropoli*. ITESO.
- Bernache, G., 2006. *Cuando la basura nos alcance: el impacto de la degradación ambiental*. CIESAS.
- Bernache-Pérez, G., Sánchez-Colón, S., Garmendia, A. M., Dávila-Villarreal, A., and Sánchez-Salazar, M. E., 2001. Solid waste characterisation study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico. *Waste Management Research* 19, 413-424.
- BID-OP, 1997. *Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe*.
- Bitrán & Asociados, 2006. *Captura de gases de efecto invernadero de rellenos sanitarios para su aprovechamiento económico*.
- Bodorow, C., Circeo, L. J., Caravati, K. C., Martin, R. C., and Smith, M. S., 2005. Plasma arc treatment of municipal and hazardous wastes. *EPA Science Forum*.
- Braun, R., and Wellinger, A., 2003. *Potential of Co-digestion*.



- Brundtland, G., 1987. Our Common Future. ONU.
- Bryman, A., 2002. Triangulation.
- Buenrostro Delgado, O., 2001. Los residuos sólidos municipales: perspectivas desde la investigación multidisciplinaria. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Buenrostro, O., and Bocco, G., 2003. Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resources, conservation and recycling* 39, 251-263.
- Burkhard, R., Hoffelner, W., and Eschenbach, R., 1994. Recycling of metals from waste with thermal plasma. *Resources, Conservation and Recycling* 10, 11-16.
- CalRecovery, Inc, 1997. Guía para rellenos sanitarios en países en desarrollo.
- Camacho, S. L., 1988. Industrial-worthy plasma torches: State-of-the-art. *Pure&Applied Chemistry* 60 (5), 619-632.
- Carrasco, J. B., and Hernández, J. F. C., 2000. Aprendo a investigar en Educación. Rialp, Ediciones, S.A.
- Castells, X. E., 2000. Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo, E., and Vásquez, M. L., 2003. El rigor metodológico en la investigación cualitativa. *Colombia médica* 34, 164-167.
- Castro, J. M., 2009. Digestores en la porcicultura. *El Economista*.
- Cedzynska, K., Kolacinsky, Z., Izydorczyk, M., and Sroczynski, W., 1999. Plasma vitrification of waste incinerator ashes. *International Ash Utilization Symposium*.
- CEPA, Centre d'Ecologia i Estudis Alternatius, 2010. Les noves tecnologies d'incineració dels Residus Municipals (RSM) (Gasificació, piròlisi i plasma). In Barcelona, España.
- Chang, J., 2001. Recent development of plasma pollution control technology: a critical review. *Science and Technology of Advanced Materials* 2, 571-576.
- Clayton, T., Clayton, A. M. H., and Radcliffe, N. J., 1996. Sustainability: A Systems Approach. Island Press.
- Contreras, F., Hanaki, K., Aramaki, T., and Connors, S., 2008. Application of analytical hierarchy process to analyze stakeholders preferences for municipal solid waste management plans, Boston, USA. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 979-991.
- Cortinas, C., 2008. Bases legales y políticas que promueven alternativas a la incineración de los residuos en México.
- Cortinas, C., 2006. Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.



- Cubas, A., Carasek, E., Debacher, N., and De Souza, I., 2005. Development of a DC-plasma torch constructed with graphite electrodes and an integrated nebulization system for decomposition of CCl₄. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 16, 531-534.
- DaoPower, 2010. Green Power Plants to be manufactured in Southern Ontario. DaoPower Canada Corp.
- D'Astous, A., Tirado, R. S., and Sigué, S. P., 2003. Investigación de mercados. Editorial Norma, Bogotá, Colombia.
- Daven, J. I., and Klein, R. N., 2008. Progress in waste management research. Nova Publishers.
- Davidsson, A., la Cour Jansen, J., Appelqvist, B., Gruvberger, C., and Hallmer, M., 2007. Anaerobic digestion potential of urban organic waste: a case study in Malmo. *Waste Management Research* 25, 162-169.
- Devuyst, D., Hens, L., and Lannoy, W. D., 2001. How Green Is the City? Columbia University Press.
- Dickey, J., Glancy, D., and Jennelle, E., 1973. Technology assessment: its application to the solid waste management programs of Urban governments. Lexington Books, Lexington Massachusetts.
- Digman, B. R., Kim, D. S., and Ju, H. S., 2009. Recent Progress in Gasification/Pyrolysis Technologies for Biomass Conversion to Energy. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28, 47-51.
- Dinh, L. T., Guo, Y., and Mannan, M. S., 2009. Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28, 38-46.
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories/Vol V-Waste. Institute for Global Environmental Strategies, Japan.
- Environmental Protection Agency U.S., 1997. Problemática ambiental.
- Ersoy, H., and Bulut, F., 2009. Spatial and multi-criteria decision analysis-based methodology for landfill site selection in growing urban regions. *Waste Management & Research* 27, 489 - 500.
- Faaij, A. P., 2006. Bio-energy in Europe: changing technology choices. *Energy Policy* 34, 322-342.
- FAO, 1986. Wood gas as engine fuel. Rome, Italy.
- Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M., and Ruiz, A., 2009. Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Management* 29, 168-173.
- Fitzpatrick, J. J., (PhD, M. W., and RN.), 2006. Encyclopedia of nursing research. Springer Publishing Company.



- Flick, U., 2004. Introducción a la investigación cualitativa. Ediciones Morata.
- Flórez, R., and Tobón, A., 2001. Investigación Educativa y Pedagógica. McGraw-Hill, Colombia.
- Gabra, M., 1996. Biomass gasification technology for developing countries. Renewable Energy for Development 9.
- García Rojas, L. M., Aguiar Trujillo, L., González Hernández, E., and Márquez Montesino, F., 2005. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco. Eco solar 1.
- Garrido, S., 1998. Regulación básica de la producción y gestión de residuos. FC Editorial.
- Gidakakos, E., Havas, G., and Ntzamilis, P., 2006. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. Waste Management 26, 668-679.
- Gobierno de México, 2007. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. México, D.F.
- Gobierno Municipal de Ensenada, 2008. Plan Municipal de Desarrollo 2008-2010. Ensenada, B.C.
- Gobierno Municipal de Ensenada, 2007. Sistema de Indicadores de Desempeño (SINDES) Reporte de resultados 2007. Ensenada, B.C.
- Golder Associates Inc., 2009. AIR CONSTRUCTION PERMIT APPLICATION St. Lucie Plasma Gasification Waste-to-Energy Facility.
- Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L., and Castells, F., 2008. Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. Waste Management 28, 2465-2471.
- Greenaction for Health and Environmental Justice, 2006. Incinerators in Disguise: Case Studies of Gasification, Pyrolysis, and Plasma in Europe, Asia, and the United States.
- Guevara, A., 1996. fundamentos básicos para el diseño de digestores anaeróbicos rurales.
- Gupta, U. G., and Lewis, P. S., 1993. A Framework for Conducting Technology Assessment for Expert Systems. Journal of Information Technology Management IV, 33-37.
- Gutiérrez Avedoy, V., 2006. Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. Instituto Nacional de Ecología.
- Henry, J. G., and Heinke, G. W., 1999. Ingeniería ambiental. Pearson Educación.
- Hernández, R., Fernández, C., and Baptista, P., 2008. Metodología de la investigación. McGraw-Hill, México, D.F.
- Hilbert, J., 2003. Manual para la producción de biogás.
- Howlett, R. J., 2009. Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the International Conference in Sustainability in Energy and Buildings (SEB'09). Springer.



- Hristovski, K., Olson, L., Hild, N., Peterson, D., and Burge, S., 2007. The municipal solid waste system and solid waste characterization at the municipality of Veles, Macedonia. *Waste Management* 27, 1680-1689.
- Huang, H., and Tang, L., 2007. Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. *Energy Conversion and Management* 48, 1331-1337.
- IEA Bioenergy, 2008. Plant list. IEA Bioenergy Task 37.
- INE Instituto Nacional de Ecología, 1997. Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México. México, D.F.
- INE Instituto Nacional de Ecología, 2001. Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. México, D.F.
- INE Instituto Nacional de Ecología, 1999. Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. México, D.F.
- INEGI, 2005. Composición de los estratos-AGEB.
- INEGI, 2006. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente.
- InEnTec, 2010. ATG - Richland, WA.
- InfoHarvest Inc, 2002. The Complete Decision Formulation, Analysis, and Presentation for Windows.
- International Council for Local Environmental Initiatives, 1996. THE LOCAL AGENDA 21 PLANNING GUIDE
 An Introduction to Sustainable Development Planning.
- Islas, J., Manzini, F., and Masera, O., 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32, 2306-2320.
- ISR Instituto para la sostenibilidad de los Recursos, 2006. Análisis y estado del arte de las tecnologías emergentes de valorización de residuos urbanos.
- Japanese Advanced Environment Equipment , JAEE, 2002. Ebara Plasma Torch Type Incineration Ash Melting System.
- Jensen, J., and Elle, M., 2007. Exploring the Use of Tools for Urban Sustainability in European Cities. *Indoor and Built Environment* 16, 235-247.
- Jiménez, B. E., 2002. La contaminación ambiental en México. Limusa, México, D.F.
- Katou, K., Asou, T., Kurauchi, Y., and Sameshima, R., 2001. Melting municipal solid waste incineration residue by plasma melting furnace with a graphite electrode. *Thin Solid Films* 386, 183-188.
- Keating, E. L., 2007. Applied combustion. CRC Press.



- Kirkeby, J. T., Birgisdottir, H., Hansen, T. L., Christensen, T. H., Bhandar, G. S., and Hauschild, M., 2006. Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. *Waste Management Research* 24, 3-15.
- Laichena, J. K., and Wafula, J. C., 1997. Biogas Technology for Rural Households in Kenya. *OPEC Review* 21, 223-244.
- Larson, E. D., 1998. Small-Scale Gasification-Based Biomass Power Generation.
- Leal Filho, W., 2000. Dealing with misconceptions on the concept of sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 1, 9-19.
- Leal, E., 2004. Plasma processing of municipal solid waste. *Brazilian Journal Of Physics* 34, 1587-1593.
- Learn, S., 2010. Oregon PSR Opposes Plasma Gasification Plan. *Physicians for Social Responsibility*.
- Liu, D., Lipták, B. G., and Bouis, P. A., 1997. *Environmental engineers' handbook*. CRC Press.
- Liu, D. H. F., and Lipták, B. G., 2000. *Hazardous waste and solid waste*. CRC Press.
- Lotfi, S., and Solaimani, K., 2009. An assessment of Urban Quality of Life by Using Analytic Hierarchy Process Approach (Case study: Comparative Study of Quality of Life in the North of Iran). *Journal of Social Sciences (15493652)* 5, 123-133.
- Lozoya Márquez, L. A., Castillo Jiménez, C., Vélez Sánchez-Verín, C., and Turcott Cervantes, D. E., 2006. Estudio de caracterización de los residuos sólidos urbanos generados en las pequeñas comunidades rurales dentro de un área natural protegida del estado de Chihuahua . In *Guadalajara*, pp. 1-14.
- Ludwig, C., Hellweg, S., and Stucki, S., 2003. *Municipal Solid Waste Management: Strategies and Technologies for Sustainable Solutions*. Springer.
- Manheimer, W. M., Sugiyama, L. E., and Stix, T. H., 1997. *Plasma science and the environment*. Springer.
- Mantilla, J., Duque, C., and Galeano, C., 2007. Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogas utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Ingeniería e Investigación* 27.
- Martínez Rodríguez, E., 2007. Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 523-542.
- Martínez, M., 1999. *La investigación cualitativa etnográfica en educación: Manual teórico-práctico*. Trillas, México, D.F.
- Martínez, M., 2006. Validez y confiabilidad en la metodología cualitativa. *Paradígma* 27, 7-33.
- McKinney, M. L., and Schoch, R. M., 2003. *Environmental science*. Jones & Bartlett Learning.



- Medina, E. P. J. L., Moya, J. L. M., and Barcelona, U. D., 2006. Deseo de cuidar y voluntad de poder. La enseñanza de la enfermería. Universidad de Barcelona.
- Mejía, J., 2004. Sobre la Investigación Cualitativa. Nuevos Conceptos y Campos de Desarrollo. Investigaciones sociales 8.
- Moeinaddini, M., Khorasani, N., Danehkar, A., Darvishsefat, A. A., and zienalyan, M., 2010. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj). Waste Management 30, 912-920.
- Morales López, J. A., 2006. Estrategia de Manejo y Conservación de Recursos Hídricos par a la Zona de Influencia Norte de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an (RBSK). In Querétaro-México.
- Morgall, J., 1993. Technology Assessment Pb. Temple University Press.
- Morris, G., 1999. The value of the benefits of U.S. biomass power. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA.
- Ohman, K. V. H., Hettiaratchi, J. P. A., Ruwanpura, J., Balakrishnan, J., and Achari, G., 2007. Development of a landfill model to prioritize design and operating objectives. Environmental Monitoring and Assessment 135, 85-97.
- Ojeda Benítez, S., Armijo de Vega, C., and Ramirez-Barreto, M., 2006. Gestión de residuos sólidos municipales. In J. Ramírez-Hernández (Ed.), Una visión de la problemática ambiental de Mexicali y su valle. Universidad Autónoma de Baja California, pp. 137-167.
- Ojeda, S., 2006. El consumo fuente de generación de basura y contaminación. In M. Quintero Núñez (Ed.), Contaminación y medio ambiente en Baja california. Universidad Autónoma de Baja California y Miguel Ángel Porrúa, pp. 227-249.
- Ojeda, S., 2005. Generación de residuos sólidos domésticos y su diferenciación por estrato socioeconómico en la familia mexicalense. In CEPIS, Mérida, Yucatán, pp. 1-10.
- Ojeda-Benítez, S., de Vega, C. A., and Ramirez-Barreto, M. E., 2000. The potential for recycling household waste: a case study from Mexicali, Mexico. Environment and Urbanization 12, 163-173.
- Ojeda-Benítez, S., Vega, C. A. D., and Ramírez-Barreto, M. E., 2003. Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city. Resources, Conservation and Recycling 39, 211-222.
- Ojolo, S., and Bamgboye, A., 2005. Thermochemical Conversion of Municipal Solid Waste to Produce Fuel and Reduce Waste. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal VII.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1996. Capítulo 4: Eliminación de residuos. In Eliminación de grandes cantidades de plaguicidas en desuso en los países en desarrollo. Colección FAO: Eliminacion de plaguicidas. ONU.
- Patton, M. Q., 2001. Qualitative Research & Evaluation Methods. Sage Publications, Inc.



- Pawłowski, Ł., Dudzińska, M. R., and Gonzalez, M. A., 2000. Thermal solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Springer.
- Perales Lorente, J. F., 2002. Desulfuración de gas de síntesis a alta temperatura y presión por absorción en óxidos regenerables.
- Pérez, N., Aiello, R., Silveira, J., and Zanzi, R., 2006. Thermodynamic study and downdraft gasifier dimensioning for cogeneration compact system in isolated localities. *Revista Ciencias Exatas* 12, 53-62.
- Planeta Azul, 2007. Entra durango a bonos verdes.
- Polprasert, C., 2007. Organic waste recycling: technology and management. IWA Publishing.
- Purohit, P., 2009. Economic potential of biomass gasification projects under clean development mechanism in India. *Journal of Cleaner Production* 17, 181-193.
- Quintanilla, A. L., 2006. Construyendo el futuro: visiones para un desarrollo rural sustentable en las comunidades de Baja California. Miguel Angel Porrúa.
- Quintanilla, A. L., 1999. Sistema de evaluación tecnológico de las fuentes alternativas de energía (eólica y solar) para las comunidades rurales de la zona costera Pacífico de Baja California.
- Quintanilla, A. L., and Fischer, D. W., 2003. La energía eléctrica en Baja California y el futuro de las renovables. Una visión multidisciplinaria. Universidad Autónoma de Baja California.
- Rajeshwari, K. V., Lata, K., Pant, D. C., and Kishore, V. V. N., 2001. A novel process using enhanced acidification and a UASB reactor for biomethanation of vegetable market waste. *Waste Management Research* 19, 292-300.
- Ramjeawon, T., and Beerachee, B., 2008. Site selection of sanitary landfills on the small island of Mauritius using the analytical hierarchy process multi-criteria method. *Waste Management & Research* 26, 439 -447.
- Ravindranath, N., Somashekar, H., Dasappa, S., and Jayasheela Reddy, C., 2004. Sustainable biomass power for rural India: Case study of biomass gasifier for village electrification. *Current Science* 87, 932-941.
- Revuelta Pereiro, J., 2003. Biomasa y gasificación. *Energía y tú* 1.
- Rizo, S. C., 2002. Ecodiseño: ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles. Ed. Univ. Politéc. Valencia.
- Rodríguez, P., 1999. Evaluación de proyectos y triangulación: Acercamiento Metodológico hacia el Enfoque Centrado en el Actor. In *Agroamérica (IICA-FIDA)*, Costa Rica.
- SAGARPA-FIRCO, 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario.



- Sánchez, M., Cuetos, M., Martínez, O., and Morán, A., 2007. Pilot scale thermolysis of municipal solid waste: Combustibility of the products of the process and gas cleaning treatment of the combustion gases. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 78, 125-132.
- Schmoldt, D. L., Kangas, J., Mendoza, G. A., and Pesonen, M., 2001. *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*. Springer.
- SECOFI Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1985a. NMX-AA-015-1985, Método del cuarteo.
- SECOFI Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1985b. NMX-AA-019-1985, Peso volumetrico "in situ".
- SECOFI Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1985c. NMX-AA-022-1985, Selección y cuantificación de subproductos.
- SEDESOL, 1996. Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales.
- SEDESOL, 1999. Sistema Normativo de Equipamiento Urbano.
- SEDESOL, 2006. Situación actual en el Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSM).
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006. Indicadores básicos del desempeño ambiental de México:2005. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.
http://www.SEMARNAT.gob.mx/informacionambiental/snua/Documents/pdf/Indicadores_basicos_2005.pdf.
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. Política y Estrategias para la Prevención y Gestión Integral de Residuos en México.
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008. Programa nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012.
- Seo, S., Aramaki, T., Hwang, Y., and Hanaki, K., 2003. Evaluation of Solid Waste Management System Using Fuzzy Composition. *Journal of Environmental Engineering* 129, 520-531.
- Seoáñez, M., and Bellas, E., 2000. *Tratado de reciclado y recuperacion de productos*. Mundi-Prensa Libros.
- Shah, K. L., 2000. *Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology*. Prentice Hall.
- Shrader-Frechette, K., 1985. *Science Policy, Ethics, and Economic Methodology*. Springer, Florida.
- Springett, D., 2003. Business conceptions of sustainable development: a perspective from critical theory. *Business Strategy and the Environment* 12, 71-86.
- Stasinopoulos, P., Smith, M. H., and Hargroves, K. C., 2009. Whole system design: an integrated approach to sustainable engineering. Earthscan.



- Stassen, H., 1995. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power. World Bank.
- Stassen, H., and Knoef, H., 2001. Small scale gasification systems. Biomass Technology Group BV.
- Tarrés, M. L., 2001. Observar, escuchar y comprender sobre la tradición cualitativa en la investigación social. Flacso México/Colmex/M.A. Porrúa.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., 1994. Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill, España.
- Terrón, P. U., 2003. Tratado de Fitotecnia General. Mundi-Prensa Libros.
- Tippayawong, N., and Khongkrapan, P., 2009. Development of a laboratory scale air plasma torch and its application to electronic waste treatment. International Journal of Environmental Science and Technology 6, 407-414.
- Valdés, L., 2009. Digestor en El Porvenir generará 300 kilowatts. Milenio.
- Valdés, L., 2010. Canalizarán más de 60 mdd para instalación digestores en México. Milenio.
- Velarde Jurado, E., and Avila Figueroa, C., 2002. Evaluación de la calidad de vida. Salud Pública de México 44, 349-361.
- Verma, S., 2002. Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.
- Villeneuve, J., Michel, P., Fournet, D., Lafon, C., Ménard, Y., Wavrer, P., and Guyonnet, D., 2009. Process-based analysis of waste management systems: a case study. Waste Management (New York, N.Y.) 29, 2-11.
- Wad, A., and Radnor, M., 1984. Technology assessment: Review and implications for developing countries. Unipub [distributor].
- Wang, G., Qin, L., Li, G., and Chen, L., 2009. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. Journal of Environmental Management 90, 2414-2421.
- William, P., 1998. Waste Treatment And Disposal. John Wiley & Sons Inc.
- Williams, P. T., 2005. Waste treatment and disposal. John Wiley and Sons.
- Williams, R., 2004. Technology assessment for biomass power generation. UC Davis.
- Young, G. C., 2010. Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes. John Wiley and Sons.
- Zanzi, R., and Sorla, S., 2006. Gasification of wood pellets in a downdraft reactor. Revista Ciencias Exactas 12, 63-69.
- Zeng, Y., Trauth, K. M., Peyton, R. L., and Banerji, S. K., 2005. Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. Waste Management & Research 23, 62-71.