



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis ambiental de la incineración  
para el manejo de residuos sólidos  
municipales de Querétaro**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO INDUSTRIAL**

P R E S E N T A

**MARY CARMEN LEYVA LÓPEZ**

Director de tesis:

**Dra. Rina Aguirre Saldivar**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Agradecimientos*

- ✚ A mis padres, por apoyarme y acompañarme en todas las peripecias de mi vida; por haberse desvelado y madrugado estos últimos 23 años y, lo más importante, por haberme dado su amor y confianza.
- ✚ A mis amigos, que estuvieron conmigo en todo momento para brindarme un sabio consejo, robarme una sonrisa y reconfortarme en momentos difíciles
- ✚ A mis profesores, por transmitirme su conocimiento y experiencias, dándome las herramientas necesarias para desenvolverme en el mundo laboral y crecer como persona.
- ✚ A la Dra. Rina Aguirre, por todas las horas que me dedicó, por la paciencia y los regaños que a lo largo de 8 meses me sirvieron para aprender a trabajar.
- ✚ A Joaquín Castillo, mi príncipe azul, por ser mi pareja y estar a mi lado. Por su amor y comprensión, por llevarme y traerme con bien a mi casa y por ser mi principal motor en la conquista de todas mis metas.

## Índice

<b>Índice de tablas y figuras</b>	ii
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Alcances y limitaciones	1
<b>Capítulo 2 Generalidades</b>	3
2.1 Sistema de manejo integral	4
2.1.1 Generación	6
2.1.2 Almacenamiento	6
2.1.3 Recolección y transporte	7
2.1.4 Transferencia	8
2.1.5 Tratamiento	9
2.1.6 Disposición final	10
2.2 Evaluación de costo-beneficio ambiental	12
2.2.1 Matriz de impacto ambiental	12
2.2.2 Costo ambiental	14
2.2.3 Costo económico	17
<b>Capítulo 3 Proceso de incineración</b>	18
3.1 Etapas del proceso de incineración	18
3.2 Tipos de incineradores	19
3.3 Control de emisiones contaminantes	22
<b>Capítulo 4 Caso de estudio: Municipio de Querétaro</b>	26
4.1 Consideraciones generales	26
4.2 Sistema actual de manejo de residuos sólidos	27
4.2.1 Generación y almacenamiento	27
4.2.2 Recolección, transporte y transferencia	30
4.2.3 Disposición final	32
4.3 Análisis del sistema de manejo de RSM actual	32
<b>Capítulo 5 SIMRSM-Qro</b>	34
5.1 Aspectos técnicos	34
5.1.1 Caracterización de residuos a incinerar	35
5.1.2 Selección del tipo de incinerador	36
5.2 Análisis costo-beneficio ambiental	36
5.2.1 Criterios de evaluación de impacto	36
5.2.2 Costo ambiental	41
5.3 Propuesta integral	44
<b>Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones.</b>	47
<b>Anexo</b>	49

<b>Mesografía.</b>	<b>52</b>
--------------------	-----------

## **Índice de tablas y figuras**

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los rellenos sanitarios	12
Tabla 2.2 Estructura de la matriz de impacto ambiental	13
Tabla 2.3 Costos de externalidades	16
Tabla 2.4 Costos de externalidades	16
Tabla 3.1 Descripción de contaminantes	22
Tabla 3.2 Límites máximos permisibles de emisiones	25
Tabla 4.1 Fuentes no domésticas de generación de RSM	28
Tabla 4.2 Empresas de recolección de RSM	30
Tabla 5.1 Poder calorífico de RSM	35
Tabla 5.2 Matriz de identificación de impacto ambiental	37
Tabla 5.3 Matriz de evaluación de impacto ambiental	40
Tabla 5.4 Composición típica del biogás	41
Tabla 5.5 Costo de externalidades	42
Tabla 5.6 Equivalencia impacto costo	43
Tabla 5.7 Costos unitarios de métodos de disposición	46
Figura 2.1 Residuos enmascarados	3
Figura 2.2 Generación diaria per capita	4
Figura 2.3 Sistema de manejo integral de RSM	5
Figura 2.4 Transporte convencional de recolección de RSM	8
Figura 2.5 Vehículos no convencionales de transporte de RSM	8
Figura 2.6 Sitios de disposición final de los RSM en México	10
Figura 2.7 Construcción de la celda diaria	11
Figura 2.8 Metodología utilizada	15
Figura 3.1 Incinerador de residuos no pre-seleccionados	20
Figura 3.2 Incinerador RDF	21
Figura 3.3 Diagrama de recuperación de energía	22
Figura 3.4 Lavador de Venturi	24
Figura 3.5 Filtro de bolsa	24
Figura 4.1 Localización Municipio de Querétaro	26
Figura 4.2 Manejo de los RSM	28
Figura 4.3 Proyección de la generación de RSM	29
Figura 4.4 Composición de RSM	30
Figura 4.5 Estación de transferencia del municipio de Querétaro	31
Figura 4.6 Relleno sanitario del municipio de Querétaro	32
Figura 5.1 Introducción de la incineración en el SMIRSM-Qro	34
Figura 5.2 Costo ambiental	43
Figura 5.3 Costo total	44
Figura 5.4 Sistema de manejo de RSM propuesto	45

## **CAPÍTULO 1. Introducción**

Los residuos sólidos municipales (RSM), conocidos comúnmente como basura, provienen de todas y cada una de las actividades humanas. El efecto ambiental más evidente de estos contaminantes es el deterioro estético de las ciudades, así como del paisaje natural, con la consecuente devaluación en los predios donde se localizan tiraderos y de las áreas vecinas. Además, puede contaminarse el suelo y cuerpos de agua, por el contacto directo con los RSM, o por la infiltración en el suelo del lixiviado (líquido producto de la descomposición de la fracción orgánica contenida en la basura que arrastra otros compuestos de los residuos).

La generación del biogás resultante de la descomposición de los residuos orgánicos representa un factor de riesgo en función de su toxicidad y explosividad, además de aportar cantidades importantes de gases de efecto invernadero como metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El depósito de los RSM en arroyos y canales o su abandono en las vías públicas puede impedir la recarga de acuíferos, favorecer la proliferación de fauna nociva y, durante la época de lluvia, obstruir los sistemas de drenaje y alcantarillado.

Recordemos que nuestro planeta es como un envase cerrado donde todo lo que se genera en él, termina acumulándose si se rebasa la capacidad de recuperación. El volumen de basura que generamos actualmente amenaza con agotar los espacios destinados para su disposición final.

México, al igual que muchos países del mundo, enfrenta grandes retos en el manejo de residuos sólidos debido, por un lado, al elevado índice de crecimiento demográfico (acompañado por la tendencia a abandonar las zonas rurales y concentrarse en centros urbanos) y, por el otro, a la tendencia consumista de la población.

Una forma de eliminar los RSM es la incineración y, aunque su costo directo es elevado (de 10 a 15 veces más alto que el relleno sanitario) y su complejidad técnica considerable, es el método más efectivo de disposición de RSM, ya que es capaz de reducir en 75% el peso y 90% del volumen de los residuos a disponer en unos cuantos minutos.

### **1.1 Objetivo**

El objetivo de este trabajo es el analizar la posibilidad de implantar un proceso de incineración como parte del sistema integral de manejo de residuos sólidos del municipio de Querétaro; estimando los beneficios y costos ambientales que conlleva.

### **1.2 Alcances y limitaciones**

El objetivo de este trabajo se cumplirá dentro del marco siguiente:

- En nuestro país el proceso de incineración no es común como parte de los sistemas de manejo de RSM, lo que provoca que no existan suficientes fuentes de información de datos locales de eficiencia y costos de operación de este tipo de procesos.
- La información referente a la producción y características de RSM, fue proporcionada por el Municipio de Querétaro.
- La propuesta del sistema de manejo de RSM se realizó a partir de bibliografía especializada, la consulta con expertos en el tema y medios electrónicos, no correspondiendo a una fuente única.
- Para el análisis de factibilidad económica se emplea el costo unitario actual (2008) para la disposición de RSM en el relleno sanitario del municipio de Querétaro y datos estimados, a partir de bibliografía especializada, para el incinerador.
- Para evaluar los costos y beneficios ambientales, se siguió la metodología propuesta en la tesis de maestría en ingeniería ambiental de Irene Camacho Rea (2003): *Análisis costo-beneficio de la incineración de residuos sólidos municipales en la ciudad de México* a partir de la cual se establecieron los criterios de evaluación.
- Los resultados de este trabajo serán presentados a las autoridades ambientales del municipio de Querétaro, pero la implantación del proceso de incineración en el Sistema Integral de Manejo de RSM de ese Municipio queda fuera del alcance de esta tesis.

Este trabajo contempla seis capítulos, siendo el primero esta introducción. El segundo y tercero presentan los conceptos básicos: el segundo habla de residuos sólidos, su manejo y define el término de costo ambiental y su evaluación. El tercero se centra en la descripción del proceso de incineración, incluyendo las etapas de éste, los tipos de incineradores y el control de emisiones contaminantes.

En el cuarto capítulo, se describe la situación del sistema de manejo de RSM que actualmente sigue el municipio de Querétaro. El quinto, considerado el medular de este trabajo, presenta la evaluación de la incineración como parte del sistema de manejo de RSM del municipio, las características del incinerador y el análisis costo-beneficio ambiental del sistema propuesto.

Finalmente, en el capítulo sexto, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

## CAPÍTULO 2. Generalidades

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, LGEEPA, define como Residuos Sólidos Municipales (RSM), los que provienen de las actividades que se desarrollan en las casas-habitación, sitios de servicios privados y públicos, establecimientos comerciales, así como los generados en la industria, salvo los que provienen de procesos de producción que pueden tener propiedades que los hagan peligrosos. En su artículo 7, fracción VI, la misma Ley establece que la regulación, manejo y disposición final de los residuos sólidos que no sean peligrosos son materia de competencia de las entidades federativas y municipios (SEMARNAT, 2007a).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)<sup>1</sup>, considera los RSM como la punta de un iceberg, formada por los productos de consumo que se desechan en grandes volúmenes pero, debajo, se encuentran los residuos que se generan en las actividades industriales que transforman las materias primas en esos productos de consumo, además de los voluminosos residuos producidos por las actividades extractivas de esas materias primas, los cuales constituyen lo que se denomina *residuos enmascarados* (figura 2.1).

**Figura 2.1** Residuos enmascarados



Fuente Medina y Jiménez, 2001

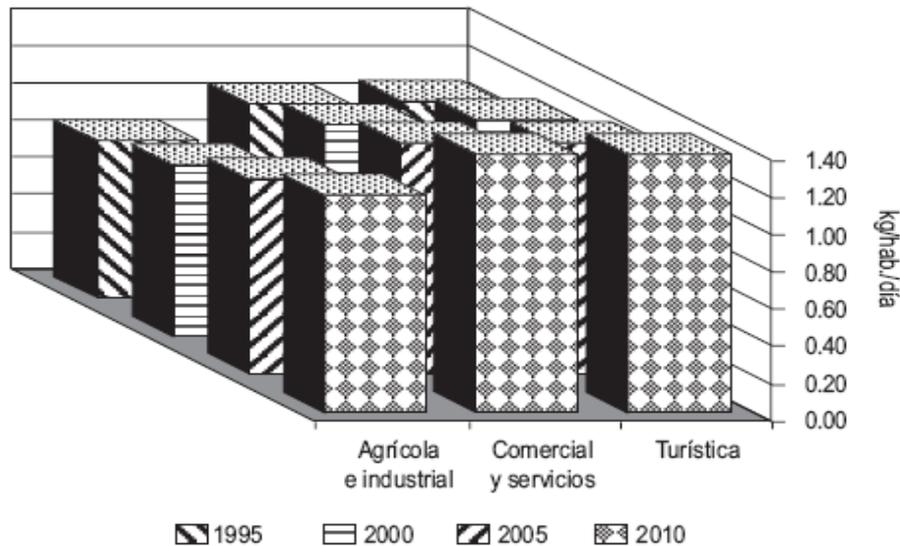
El ser humano desarrolla actividades y procesos productivos ineficientes que consumen grandes cantidades de recursos y generan elementos sin valor o con cualidades dañinas al ambiente, a los cuales se les denomina residuos.

La generación de RSM en nuestro país aumentó de 300 gramos por habitante por día, en la década de los cincuentas, a más de 860 gramos, en promedio, en el año 2000; la población se incrementó en el mismo periodo de 30 millones a más de 97 millones, estimándose un aumento de 9,000 a 82,400 toneladas diarias en la

<sup>1</sup> La OCDE es un foro de consulta y coordinación entre gobiernos, en el que se discuten y analizan las políticas económicas, financieras, ambientales, industriales, tecnológicas, científicas, educativas, laborales y comerciales de los países miembros. México ingresó en 1994

generación nacional de RSM (Medina y Jiménez, 2001). En otras palabras, en cuatro décadas, la generación de RSM se incrementó nueve veces. La figura 2.2 muestra la tendencia a la alza de RSM en tres de los sectores económicos de nuestro país.

**Figura 2.2** Generación diaria per cápita



Fuente Medina y Jiménez, 2001

La composición, cantidad y volumen de los residuos varían según el tipo de actividades y hábitos de consumo que los generan. Sus características se han transformado de materiales fácilmente biodegradables a elementos cuya descomposición es lenta y requieren para degradarse de procesos físicos, biológicos o químicos cada vez más complejos, generando impactos adversos considerables sobre el ambiente.

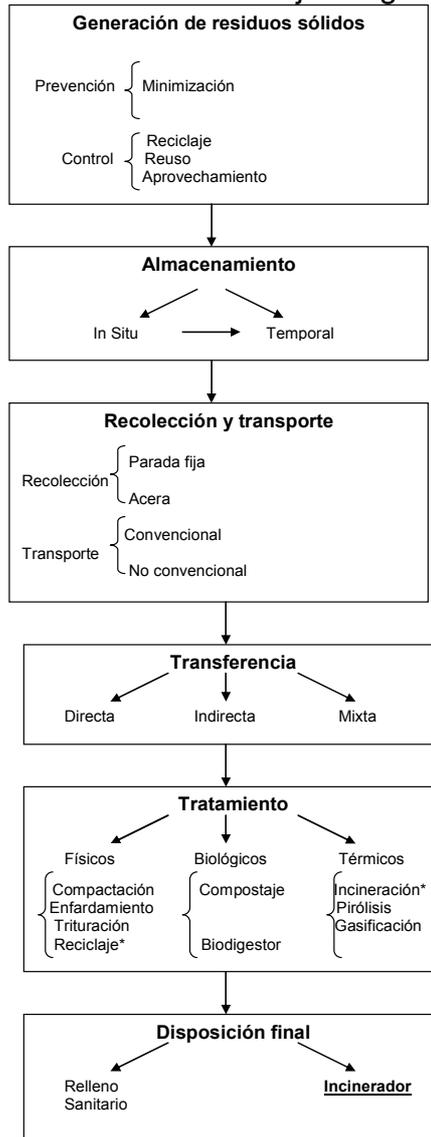
## 2.1 Sistema de Manejo Integral

Un sistema de manejo integral de RSM (SMIRSM) considera las etapas de generación, almacenamiento, recolección y transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de residuos de una forma que va de la mano con los principios de salud pública, economía, ingeniería, conservación, estética y las características propias de la población.

Las etapas de un SMIRSM se esquematizan en la figura 2.3, donde la incineración aparece dentro de dos diferentes bloques debido a que existen autores que la han considerado como un tratamiento, mientras que para otros se trata de un método de disposición final. Teniendo en cuenta que el producto final del proceso de incineración de RSM son cenizas inertes (no contaminantes), en este trabajo es considerada como disposición final.

De manera similar, el reciclaje aparece en dos bloques: la legislación mexicana lo considera un método de tratamiento (SEMARNAT, 2007b); sin embargo; considerando que la dificultad y costo de recuperación aumenta notablemente cuando los residuos reciclables han sido mezclados con otros, en este trabajo se considera que el reciclaje debe ser aplicado desde la fuente de generación, como un método de control en fuente (ver 2.1.1).

**Figura 2.3** Sistema de manejo integral de RSM



### **2.1.1 Generación**

La etapa inicial y determinante de un SMIRSM es sin duda la generación, la cual determina la cantidad, composición, volumen y sitio, a partir de los cuales se diseñarán las etapas siguientes.

Por tanto, las estrategias orientadas a la minimización de residuos (prevención de su generación) impactan directamente a todo el sistema de manejo y son la primera medida a considerar en cualquier programa serio que se elabore para resolver el problema de RSM de una localidad.

Las estrategias de minimización varían de acuerdo con el sector de la población a quienes van dirigidas. Una manera efectiva de promover la minimización de residuos, experimentada en otros países, ha sido aplicar el principio del *que contamina paga*, consistente en cobrar a quien genera residuos conforme a la cantidad producida (Medina y Jiménez, 2001).

Cuando no se emplean políticas de prevención (minimización), puede recurrirse al control en fuente, como el reciclaje, reuso y aprovechamiento. Esto es, separar los residuos antes de que se mezclen, ayudando así a conservar recursos y obtener materiales con algún valor comercial (Aguirre et al, 2001).

### **2.1.2 Almacenamiento**

El almacenamiento de los RSM debe diseñarse para evitar daños a la salud pública o al ambiente, hasta que son recolectados para ser dispuestos. Se deben considerar dos aspectos fundamentales: el sitio de almacenamiento y las características del contenedor. Las zonas y los recipientes de almacenamiento deben de estar diseñados de acuerdo con la cantidad y peso volumétrico de los RSM, así como la frecuencia de recolección (Aguirre et al, 2001).

La situación que guardan casi todas las zonas de almacenamiento es deficiente, particularmente en las fuentes de gran generación como son mercados, tiendas de autoservicio y centros de abasto, ya que no fueron diseñadas como tales y exponen la salud de la población.

La gran variedad de recipientes que son utilizados para el almacenamiento de RSM no fueron diseñados para ello (ej. las bolsas de polietileno proporcionadas por todo tipo de comercios), y algunos de ellos no poseen la resistencia adecuada; al romperse bajan la eficiencia del proceso de recolección, incrementando costos y la posibilidad de ocasionar contaminación (Aguirre et al, 2001).

### 2.1.3 Recolección y transporte

La recolección tiene por objeto retirar los RSM de la fuente generadora (hogar, comercios, oficinas, mercados, etc.), a fin de transportarlos para su tratamiento o llevarlos directamente al sitio de disposición final. Entre los métodos más comunes para la recolección se tienen el de parada fija y el de acera, pudiendo ambos contar con la entrega directa por parte del generador o bien el personal del camión recolector recoge los RSM de contenedores de almacenamiento temporal.

Dentro de los factores más importantes que intervienen en el diseño de la recolección y transporte destacan:

- Frecuencia

Mientras menor sea, más económica es la recolección, sin embargo por razones sanitarias y considerando el contenido de materia orgánica de los RSM en México, no debe reducirse de dos veces por semana (Aguirre et al, 2001).

- Ruta de recolección

En ella se establecen los recorridos específicos (tiempos y movimientos), que debe realizar cada camión de recolección. Un mal diseño produce tiempos excesivos de recolección, carga inadecuada del camión (es deseable realizar cargas del 90% o más), retraso en la entrega de los RSM, ineficiencia del personal, gasto extra de combustible, problemas de tránsito, apatía del público y la proliferación de tiraderos clandestinos.

- Equipos de recolección

Depende de las condiciones y características de la comunidad a servir. Se encuentran desde camiones compactadores, camiones con divisiones para recolección segregada, camiones de redilas, hasta carritos manuales. Sin embargo, los vehículos adecuados deberán evitar el escurrimiento de lixiviados, la resuspensión de partículas en el aire y los malos olores y deberán contar con el personal calificado.

Para elegir el vehículo apropiado se deberá considerar la distancia hacia el lugar de acopio, tratamiento o disposición final, y las características de los RSM a recolectar. Los *vehículos convencionales* son el camión compactador y el camión contenedor (ver fig. 2.4). El primero es el más utilizado en zonas residenciales y está diseñado para compactar residuos; algunos cuentan con una caja dividida en varias secciones para la separación de RSM (Henry y Heinke, 1999). El segundo recoge los residuos en un contenedor de gran tamaño, dejando otro vacío. Generalmente este vehículo es utilizado para recoger residuos de empresas o edificios de departamentos.

Se le denomina *equipo no convencional* a todos aquellos vehículos que no fueron diseñados para el traslado de RSM, pero se utilizan por ser más baratos o adaptables a las necesidades de las comunidades a servir. En la figura 2.5 se muestran algunos ejemplos: el camión de redilas es el más usado en colonias de

estrato social medio y bajo; mientras que los vehículos de tracción animal y los *carritos de basura* se utilizan para comunidades marginales o para pepeña. La recolección y transporte representa la actividad más cara del servicio de aseo urbano y del SMIRSM (Medina y Jiménez, 2001).

**Figura 2.4** Transporte convencional de recolección de RSM



Camión compactador



Camión contenedor

**Fuente** Internacional de camiones y Maquinaria, <http://www.internacionaldecamiones.com>

**Figura 2.5** Vehículos no convencionales de transporte de RSM



Camión de redilas



Vehículos de tracción animal



Carrito de basura

**Fuente** Saint Martin S. R, 1999, *La Ciudad de México*, [http://www.geocities.com/camp\\_pro\\_amb/ciudad.htm](http://www.geocities.com/camp_pro_amb/ciudad.htm)

### 2.1.4 Transferencia

El término transferencia se refiere a las instalaciones en donde se hace el traslado de basura de un vehículo recolector a otro vehículo con mayor capacidad de carga. Este segundo vehículo, o transporte suplementario, es el que traslada los RSM hasta su destino final. Las estaciones de transferencia sólo se emplean cuando la distancia entre el punto de generación y el sitio de disposición final lo justifica.

El objetivo de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia global de la recolección, a través de la economía en el sistema de transporte y en la disminución

del tiempo ocioso de la mano de obra empleada en la recolección, así como para atender el posible aumento en la demanda (Aguirre et al, 2001).

Las estaciones de transferencia pueden ser de descarga directa, indirecta o mixta, siendo estas últimas las más empleadas en México, ya que resultan mucho más versátiles y permiten el manejo de cantidades excesivas no programadas de RSM.

### **2.1.5 Tratamiento**

El tratamiento de RSM se refiere al conjunto de técnicas o métodos de procesamiento que se aplican para modificar sus características y hacer más fácil su disposición final (SEMARNAT, 2007b).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, que hace referencia a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos en el territorio nacional, considera el reciclaje como un método de tratamiento (SEMARNAT, 2007b). Sin embargo, es necesario hacer hincapié que para este punto los residuos ya están mezclados y por lo tanto no se puede recuperar la totalidad de materiales reciclables además de provocar costos adicionales. Por estas razones se recomienda que el reciclaje se considere como un método de control en fuente y se implante en la etapa de generación.

Los métodos de tratamiento pueden ser:

- Físicos

Estos tratamientos modifican la apariencia de los residuos mediante compactación, trituración y enfardamiento.

- Biológicos

Los tratamientos biológicos aprovechan el metabolismo de microorganismos para degradar la materia orgánica y obtener composta (para la remediación de suelos), o biogás (para utilizarlo como combustible).

- Térmicos

Se utilizan para la reducción en volumen de RSM mediante su conversión en gases y cenizas por medio de procesos de calor. La combustión con oxígeno en exceso sobre las necesidades estequiométricas se denomina incineración con exceso de aire. La gasificación es la combustión parcial de los residuos sólidos bajo condiciones subestequiométricas para generar un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. La pirólisis es el procesamiento térmico de residuos en ausencia completa de oxígeno.

En el presente trabajo se considera a la incineración una forma de disposición final de RSM, factible de ser aplicada en nuestro país. Y para optar por ella es necesario

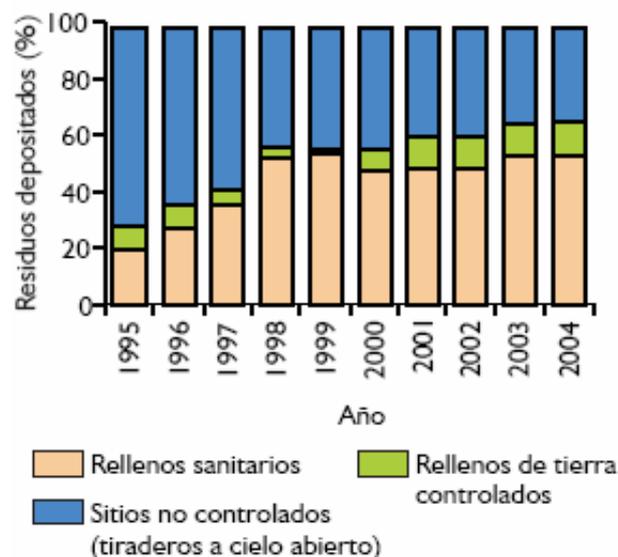
comparar los costos ambientales y económicos del incinerador con respecto a los del relleno sanitario.

### 2.1.6 Disposición final

La disposición final es la última etapa del SMIRSM y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente y la salud de la población, por lo que se deben minimizar los impactos negativos hacia el entorno y preservar racionalmente el suelo; de aquí que al sitio de disposición final deberán llegar solo los residuos que no tienen otra posibilidad.

Aunque se tiene la plena conciencia de la importancia de mantener una adecuada disposición final de los RSM, en la actualidad aún prevalece la práctica del *tiradero a cielo abierto* (depósito incontrolado directamente en el suelo), provocando la contaminación del aire, agua y suelo generando así problemas de salud pública y marginación social (figura 2.6).

**Figura 2.6** Sitios de disposición final de los RSM en México



**Fuente** Sedesol, 2005, Dir Gral de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas.

El relleno sanitario es una forma de disposición final versátil y de bajo costo, pero necesita un apropiado diseño y control en su operación, mantenimiento y clausura para garantizar que su utilización sea segura. Su principio de operación consiste en depositar los RSM en un espacio determinado (llamado celda diaria), compactándolos con el fin de que ocupen el menor volumen posible para después cubrirlos con una capa de tierra.

La celda diaria contiene los RSM generados en un día, compactados y cubiertos con 15 o 30 cm de tierra natural (figura 2.7), para evitar el arrastre de materiales, prevenir

el contacto con fauna nociva y controlar la entrada de agua (Tchobanoglous y Theisen, 1996). Como resultado de la degradación de la fracción orgánica, así como de las reacciones químicas y humedad presentes en los residuos, se forma un líquido, llamado lixiviado.

Los rellenos sanitarios se dividen en manuales y mecanizados. Los manuales no necesitan maquinaria pesada para su operación y en ellos los residuos alcanzan un grado de compactación de hasta  $500 \text{ kg/m}^3$ . Los rellenos mecanizados utilizan maquinaria pesada para lograr una compactación mayor de  $500 \text{ kg/m}^3$  (Henry y Heinke, 1999).



**Fuente** Meléndez C., 2004, Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios

La SEMARNAT establece, a través de la NOM-083-SEMARNAT-2003, las características de los rellenos sanitarios; entre ellas:

- Contar con una barrera geológica (geomembrana)
- Garantizar el manejo adecuado del biogás generado por la degradación de residuos orgánicos
- Tener un sistema de captación y extracción de los lixiviados para la recirculación o tratamiento
- Minimizar la infiltración de agua de lluvia al relleno por medio de un drenaje pluvial
- Cubrir los residuos en un lapso menor a 24 horas después de su depósito (SEMARNAT, 2006).

Para finalizar esta sección, en la tabla 2.1 se resumen las ventajas y desventajas que conllevan la utilización del relleno sanitario como método de disposición final.

Considerando las desventajas de los rellenos sanitarios y el aumento incesante en la generación de RSM, es necesario analizar otras formas de disposición final, por lo que el capítulo siguiente revisa los principios de la incineración, para posteriormente compararla con la disposición de esos mismos residuos en un relleno sanitario.

**Tabla 2.1** Ventajas y desventajas de los rellenos sanitarios

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Versatilidad en la disposición de residuos</li> <li>✓ Bajo costo de operación y mantenimiento comparado con métodos de tratamiento</li> <li>✓ Fácil operación</li> <li>✓ No requiere de personal especializado para su operación y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× El espacio que ocupa es muy grande</li> <li>× Se requieren tipos de suelo y condiciones geológicas especiales para su construcción</li> <li>× El tiempo de descomposición de los RSM es largo</li> <li>× Emite gases de descomposición por varios años</li> <li>× Genera lixiviados</li> <li>× Necesita de supervisión aún después de su clausura</li> <li>× Es un ambiente propicio para la proliferación de fauna nociva</li> <li>× Requiere material de cobertura</li> <li>× Reduce el valor comercial de terrenos aledaños</li> <li>× El terreno ocupado queda inutilizable</li> </ul>

Desde la generación hasta la disposición final de los RSM, el ambiente se contamina de diversas maneras; en seguida se define qué es el impacto ambiental y como puede éste ser evaluado.

## 2.2 Evaluación de costo-beneficio ambiental

Para poder determinar el costo ambiental es necesario conocer el impacto que las actividades antropogénicas ocasionan al ambiente y convertirlo a unidades monetarias. Son pocas las ocasiones en las cuales se puede evaluar el efecto causado por un contaminante pues, además de los daños directos cuantificables se producen efectos secundarios (externalidades o costos sombra), cuya evaluación, además de difícil, puede resultar muy controversial.

Sin embargo, con el fin de comparar los dos métodos de disposición de RSM de interés para este trabajo, es necesario evaluar los costos directos, indirectos, económicos y ambientales asociados con ambos métodos. La metodología propuesta por Camacho (2003) ofrece esta posibilidad; en ella se combinan dos herramientas de administración ambiental: la técnica de *matrices de impacto ambiental* y la de *costos de externalidades*.

### 2.2.1 Matriz de impacto ambiental

Un estudio de impacto ambiental puede definirse como la identificación y evaluación sistemática de los posibles efectos de proyectos, planes, programas o nuevas

legislaciones que repercutan en los componentes físico-químicos, biológicos, culturales y socioeconómicos de una región en particular; siendo su principal propósito la inclusión de dichos aspectos como criterio importante de decisión (Canter, 1996). En México, el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de evaluación del impacto ambiental (SEMARNAT, 2008b) establece las modalidades y características de los estudios de impacto ambiental que debe realizarse para cada tipo de proyecto, así como las herramientas aceptadas para la evaluación de los posibles impactos.

Una de las herramientas de mayor empleo en la actualidad es la llamada *matriz de impacto*. Este método consiste en la construcción de tres matrices en las que se muestran las actividades realizadas dentro de un proyecto en las etapas de construcción, operación y cierre del mismo, y los posibles efectos que estas actividades podrían tener sobre el ambiente (ver tabla 2.2).

Es importante destacar que la *matriz de impacto* son por lo menos tres matrices, cuyas entradas verticales y horizontales coinciden (impacto y actividad), pero su función es diferente. Estas matrices son comúnmente llamadas: de identificación, de evaluación y de mitigación.

**Tabla 2.2** Estructura de la matriz de impacto ambiental

Impacto \ Actividad	Construcción	Operación	Cierre
Generación de ruido			
Generación de olores			
Generación de empleos			
Emisiones de CO			
...			

En la primera matriz se *identifican* los impactos esperados de cada una de las actividades del proyecto (ver tabla 5.2). El principal objetivo en la elaboración de esta matriz es la integración del grupo de expertos que posteriormente evaluarán los impactos esperados, ya que en esta matriz se definirán las actividades que por sus efectos deben ser tomadas en cuenta, así como los posibles impactos relacionados.

En la matriz de evaluación se asignan valores a los impactos previamente identificados. La asignación del valor (magnitud del efecto esperado) debe realizarse a partir de datos de campo o laboratorio siempre que sea posible, y cuando no, por un grupo de expertos (en busca de la mayor objetividad).

La asignación de valores puede ser directa, ponderada o compleja, ya sea que sólo considere un valor simple, éste se pondere de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia, o bien, emplee fórmulas matemáticas para incluir otros factores (reversibilidad del daño, amplitud del efecto, etc.). Para propósitos de este trabajo, considerando que no fue un grupo de expertos quien realizó la evaluación y los datos disponibles fueron limitados, se empleó una asignación directa y la escala de valores

de +3 (efecto muy favorable) a -3 (efecto muy desfavorable), pasando por 0 (no hay efecto). El significado ambiental de cada uno de los valores de la escala (criterios de evaluación) se presenta en la sección 5.2.1.

La técnica de asignación de valores y la escala de los mismos depende fundamentalmente de la decisión de los expertos involucrados y de la disponibilidad de datos. De +10 a -10 se emplea sólo en proyectos de gran envergadura donde los recursos técnicos y económicos no son una limitante; la escala de +5 a -5 es la más común en los estudios de impacto ambiental que se realizan en México (Canter, 1996).

La aplicación de métodos complejos de asignación de valores y la integración de grupos numerosos de expertos pretende reducir la subjetividad que necesariamente acompaña a una técnica como ésta. Sin embargo, al usar matrices de impacto como herramienta comparativa entre dos proyectos diferentes (relleno sanitario e incinerador), se considera que la subjetividad del evaluador no experto tendrá el mismo peso para ambos proyectos y por tanto la magnitud de la comparación será representativa.

La tercera matriz, llamada de *mitigación*, considera el empleo de técnicas de control o prevención no incluidas en el proyecto original, de tal manera que los efectos adversos reducen su valor, o los positivos lo aumentan, permitiendo al tomador de decisiones conocer el *efecto global* de esas técnicas.

En este trabajo sólo se utilizaron las dos primeras, sobreponiendo dos diferentes proyectos y con propósitos comparativos (ver tabla 5.3).

### **2.2.2 Costo ambiental**

El término de *externalidad* se refiere a todos los factores intangibles que por su naturaleza no se pueden medir directamente, pero se sabe están relacionados con una actividad específica y afectan de manera positiva o negativa el entorno.

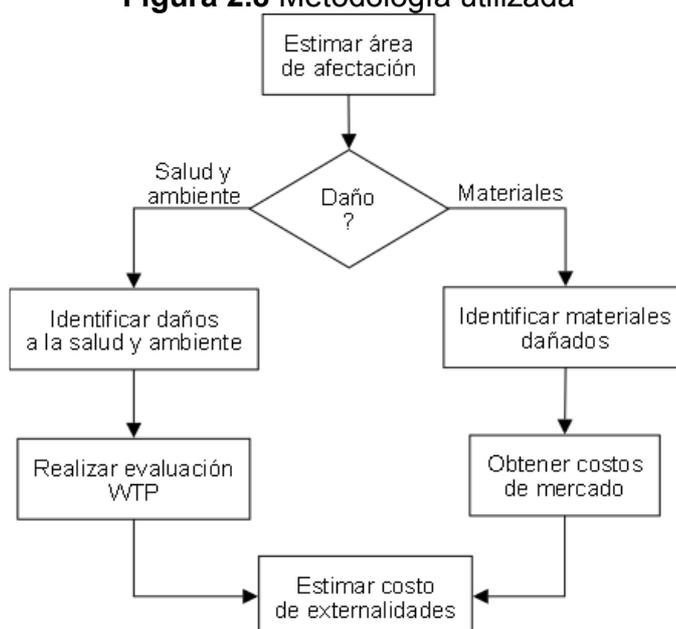
Este término, originalmente empleado en el ámbito financiero, se ha extendido hasta la problemática ambiental. Sin embargo, como el mercado asociado a los bienes naturales es tan incipiente, aún existen limitaciones debido a la falta de información relacionada con el deterioro del entorno o a que la información con la que se cuenta no es suficiente para una evaluación económica.

Desde los años noventa a la fecha se han realizado diferentes estudios en Estados Unidos y algunos países de la Unión Europea, con el objetivo de cuantificar económicamente el daño que ocasionan ciertas actividades humanas a la salud y al ambiente.

Para la realización del presente trabajo se como referencia el reporte realizado en el 2004 por el Departamento de Asuntos Ambientales, de Alimentos y Rurales de Inglaterra, DEFRA, (por sus siglas en inglés Department for Environment, Food and Rural Affairs).

Dicho estudio se encuentra dividido en dos etapas; en la primera se determinan los efectos que se sabe, ya sea por estudios realizados previamente o por literatura especializada, que están relacionados con las emisiones a la atmósfera de distintos contaminantes (como: muerte prematura, enfermedades respiratorias, cáncer, hospitalización por problemas cardiovasculares, defectos de nacimiento, daños a edificios y materiales, pérdida de cultivos y otros daños a ecosistemas). En la segunda etapa se estiman los costos en términos monetarios: cuando el daño es a la salud o al ambiente se hace a través de la cantidad que la población está dispuesta a pagar por el bien afectado (WTP, willingnes to pay); y cuando el daño es en materiales, se emplea el precio de estos en el mercado (Turner et al, 2004). La figura 2.8 muestra el esquema de la metodología empleada.

**Figura 2.8** Metodología utilizada



Para estimar el valor de las externalidades del SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, DEFRA realizó los siguientes pasos:

- Identificar las fuentes fijas de emisión. En el estudio se consideraron 789 fuentes, de las cuales 15 fueron incineradores de RSM.
- Estimar el área de afectación de los contaminantes por medio de dos modelos matemáticos de dispersión atmosférica (ADM3.1 y una matriz de dispersión).
- Estimar el impacto a la salud, al ambiente y sobre los materiales, mediante los posibles efectos conocidos de los contaminantes en cuestión.

- d) Realizar la evaluación económica para los daños a la salud y al ambiente empleando la metodología WTP.
- e) Determinar el costo del daño a materiales de acuerdo con su depreciación.

En la tabla 2.3 se exponen los valores encontrados por DEFRA. Dichos rangos surgen de dos diferentes escenarios, uno pesimista y otro optimista, utilizados para cuantificar el daño a la salud.

**Tabla 2.3** Costos de externalidades

Contaminante	Cobertura	Valor* (\$/Ton)
SO <sub>2</sub>	Efectos en la salud	8,514.66 – 55,324.92
	Materiales	4,583.25
	Total	13,097.91 – 59,908.17
NO <sub>x</sub>	Efectos en la salud	3,136.98 – 19,901.49

\*Valores en el 2003, considerando que una libra es \$20.37 (Go Currency, 2008).

**Fuente** Turner et al, 2004.

También se cuenta con los costos de externalidades utilizados por Rosado y Tovar (1993) ocasionados por SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, emitidos por la generación de energía eléctrica, considerando:

- a) Daños a la salud
- b) Degradación del ambiente
- c) Desperdicio de energía térmica
- d) Peligro latente de siniestro por la gran cantidad de combustible utilizados
- e) Problemas estéticos y sociopolíticos que representa cualquier planta de generación eléctrica

Su evaluación consiste en determinar las erogaciones que se deben realizar para remediar los daños ocasionados por la emisión de estos gases; proponiendo los valores que se presentan en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Costos de externalidades

Contaminante	Valor* (\$/Ton)
SO <sub>2</sub>	17,163
NO <sub>x</sub>	6,930

\*Valores en 1993.

**Fuente** Rosado y Tovar, 1993

Resumiendo: para obtener el costo ambiental del relleno sanitario y del incinerador, se emplea la matriz de evaluación de impacto ambiental para obtener el *valor de impacto* ( $VI_i$ ) del contaminante ( $i$ ); posteriormente, empleando los costos de externalidades, se calcula el *costo de externalidad* ( $CE_i$ ) asociada con ese contaminante y, finalmente, el índice de equivalencia impacto/costo ( $I/C_i$ ) del mismo. Esto es:

$$I/C_i = CE_i / VI_i$$

Entre mayor sea el número de índices de equivalencia calculados, mayor será la representatividad del costo ambiental asignado al proceso que se analiza. A partir de los valores obtenidos se obtiene el *índice promedio de equivalencia* ( $I/C_{prom}$ ), el cual deberá ser multiplicado por el valor total de impacto y sumarse al costo económico para, entonces, comparar el costo total de cada proceso.

$$I/C_{prom} = \sum (I/C_i) / n$$

$$\text{Costo ambiental} = I/C_{prom} * VI_{total}$$

### 2.2.3 Costo económico

Para establecer la rentabilidad financiera de un proyecto, comúnmente se calcula el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). Sin embargo, se sabe de antemano que la disposición de RSM no son procesos rentables (no hay tasa de retorno) sino necesarios y, por lo tanto, se selecciona aquel que posea un VPN menor.

En este trabajo, considerando que tiene propósitos comparativos, se empleará como costo económico solamente el costo directo erogado por el gobierno para disponer de una tonelada de residuos (costo unitario), ya sea en el relleno sanitario o en un incinerador.

En el caso del relleno sanitario se conoce el costo unitario actual para el sitio en que se disponen los RSM del municipio de Querétaro, 156 pesos/ton (Ayuntamiento de Querétaro, 2008), pero no así para el incinerador, ya que el costo varía considerablemente con la composición de los residuos a disponer, así como con el diseño interno de la cámara de incineración y quemadores, y la recuperación o no de energía. Para este trabajo se emplea el costo reportado por el Dr. Mario Yarto (2006), para un incinerador de RSM en bruto sin recuperación de energía (1,318 pesos/ton).

En el siguiente capítulo se revisan los diferentes tipos de incineradores, los casos en los que puede existir recuperación de energía y sus características generales de construcción, operación y mantenimiento.

## **CAPÍTULO 3. Proceso de incineración**

La incineración es el tratamiento térmico de oxidación química. La incineración de RSM se realiza con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno, y los productos de esta reacción son calor, gases de combustión y residuos sólidos inertes (cenizas). Los principales gases de combustión son los óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua.

La incineración es capaz de reducir el volumen original de los RSM del 85 al 90%, además de permitir la recuperación de energía en forma de calor (Medina y Jiménez, 2001).

### **3.1 Etapas del proceso de incineración**

La operación de un incinerador consta de tres etapas principales: alimentación (pretratamiento), combustión y disposición de cenizas:

- Alimentación/pretratamiento

Los RSM a incinerar pueden ser pre-seleccionados, separando aquellos difíciles de incinerar, o bien triturados para aumentar la eficiencia del proceso y evitar que se obstruyan las líneas de alimentación. También pueden ser precalentados, con los gases de salida del incinerador para iniciar su secado y acelerar la reacción, o simplemente mezclados para homogenizarlos.

Después de la fosa de almacenamiento la basura es transportada hacia la cámara de combustión por medio de bandas o rodillos.

- Combustión

La cámara de combustión consta de varias secciones que comparten el mismo propósito, garantizar que la combustión sea lo más completa posible.

En la primera sección los residuos se secan y calientan. Después, en la zona de combustión primaria, se inicia el proceso de oxidación; en esta etapa se suministra aire en cantidad suficiente y de manera homogénea para que se mezcle con los gases ahí presentes. En la zona de combustión secundaria, los residuos terminan de quemarse y se completa la combustión de los gases formados en la etapa anterior.

La eficiencia de la combustión depende principalmente de tres factores: temperatura; tiempo de residencia; y mezclado (turbulencia) entre los residuos, el combustible y el aire de combustión. Cuando la temperatura es lo suficientemente elevada, se garantiza la ruptura de los enlaces moleculares de los residuos y, para esto, se debe contar con tiempo suficiente. El tiempo y la temperatura requeridos son función de la cantidad y composición (poder calorífico) de los residuos a incinerar.

El exceso de aire representa la relación entre el aire teórico requerido y el suministrado. Se emplea un exceso de aire para aumentar el contacto entre combustible y comburente, y asegurar así una combustión completa; el aire en exceso no debe reducir excesivamente la temperatura.

- Disposición de cenizas

Las cenizas son la porción no quemada de los RSM y están constituidas por material mineral, carbono no quemado y la mayoría de los metales presentes en los RSM. De un proceso de incineración se esperan *cenizas de fondo*, que son las que caen directamente de las parrillas de las cámaras de combustión y *cenizas volantes*, que se recogen en los sistemas de filtración de gases.

Ambos rechazos deben manejarse de tal forma que se evite el contacto con el ambiente. Las cenizas de fondo que se retiran de la cámara de combustión, se almacenan en contenedores cubiertos y se transportan a los sitios de disposición final, mientras que la fracción volante debe capturarse mediante el equipo de control de partículas abajo mencionado (Tchobanoglous y Theisen, 1996).

La generación de contaminantes: cenizas volantes y gases de combustión incompleta, depende de la composición de RSM y de los parámetros de operación: temperatura, tiempo y exceso de aire. Sin embargo, para evitar daños al ambiente, todo incinerador, además de controlar estos parámetros, debe contar con equipos de control de emisiones.

### **3.2 Tipos de incineradores**

Los incineradores modernos tienen la ventaja de ocupar un espacio reducido, por lo que pueden ubicarse cerca del sitio de generación de los RSM y donde exista fácil acceso para los vehículos de transporte. El diseño o selección de un incinerador se realiza según la cantidad y características de los RSM, así como el espacio disponible y la aceptación del público. Los incineradores se dividen de acuerdo con la pre-selección o no de los RSM. Esto es:

- Incinerador de RSM no pre-seleccionados

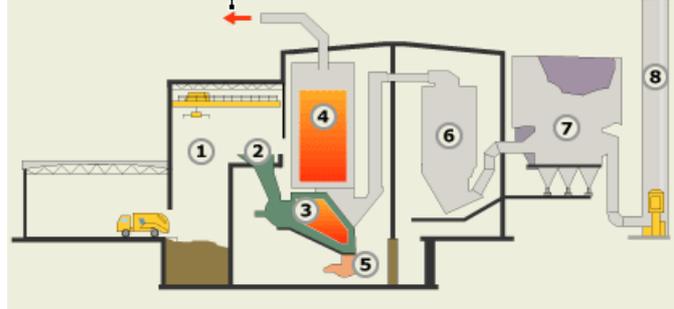
En este tipo de incineradores, en bruto, sólo se retiran los RSM de gran tamaño antes de colocarlos en la tolva de alimentación. Puede incinerar de 50 a 1000 toneladas por día. La temperatura promedio alcanzada es de 1300°C y se requiere de un 100% o hasta 200% de exceso de aire (De Paul y Crowder, 1989). En la figura 3.1 se ilustra el principio de funcionamiento de este incinerador.

Uno de los componentes cruciales es el sistema de parrillas, que sirve para mover los residuos a través del incinerador e inyectar aire para la combustión. El calor generado por la combustión se puede utilizar para la producción de energía eléctrica

o mecánica y así disminuir el consumo de combustible y los costos de operación del incinerador.

**Figura 3.1** Incinerador de residuos no pre-seleccionados

- 1.-Fosa de almacenamiento
- 2.-Tolva de alimentación
- 3.-Cámara de combustión
- 4.-Caldera que permite aprovechar energía
- 5.-Recolección de cenizas de fondo
- 6 y 7.- Sistemas de control
- 8.- Chimenea



**Fuente** Heap T., 2006, How it works: mass waste incinerator, BBC environment correspondent, UK

Cuando los RSM son incinerados con poco oxígeno, el proceso es conocido como *incineración sin exceso de aire*. Los residuos son colocados en el sistema de alimentación y empujados hacia la primera cámara; el tiempo de residencia de éstos varía entre 8 y 12 horas. El aire ingresado, que representa aproximadamente el 40% del requerido para la combustión, funciona como gasificador, es decir, evapora los residuos por temperatura, lo cual permite disminuir el tiempo de residencia en la segunda cámara.

La temperatura de la segunda cámara puede variar de 650 hasta 1,000°C y aquí se ingresa alrededor del 80% del aire total requerido para que la combustión sea completa. El tiempo de residencia está en función de la temperatura, misma que se regula variando la entrada de aire y con ayuda de un quemador auxiliar. A temperaturas mayores a 1,000°C, el tiempo mínimo de residencia es de un segundo (De Paul y Crowder, 1989).

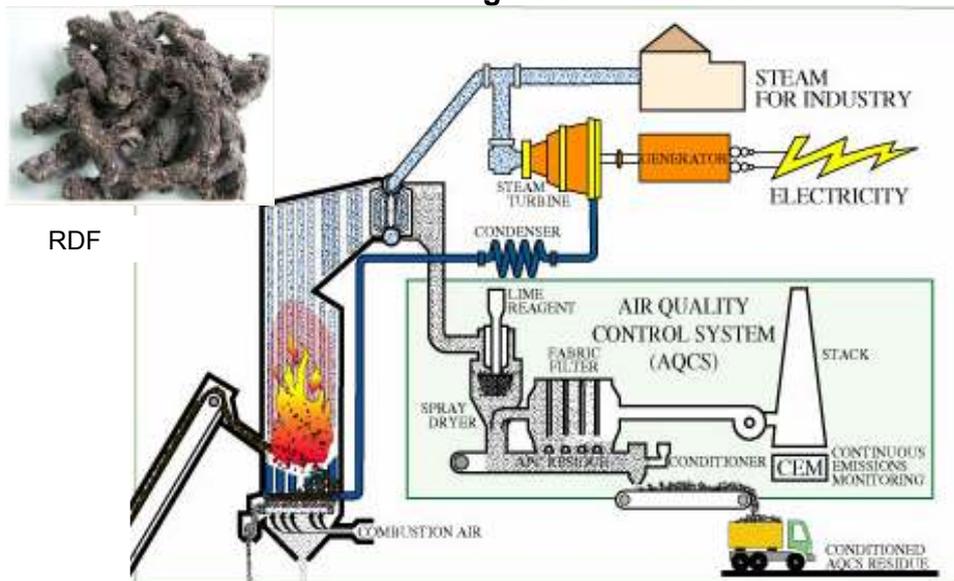
El poder calorífico de los RSM incinerados en bruto es extremadamente variable al igual que su composición, por lo que es necesario adicionar combustible extra. El requerimiento de combustible varía con el poder calorífico de los RSM y su contenido de humedad.

▪ Incinerador con combustible derivado de residuos (RDF)

Este tipo de incinerador, RDF (por sus siglas en inglés Refuse Derived Fuel), se diferencia del anterior porque utiliza RSM como combustible. Sólo la fracción de residuos que por su poder calorífico puede actuar como combustibles se tritura y compacta. Los RDF se alimentan, junto con aire caliente, a través de un distribuidor donde se queman parcialmente, llegando a incinerarse por completo en la cámara de combustión; la figura 3.2 se muestra un esquema de este proceso (Corey, 1990).

Como el poder calorífico de los RSM de este incinerador debe ser mayor al de RSM no pre-seleccionados, son físicamente más pequeños y eficaces gracias a la naturaleza homogénea del combustible, lo cual también mejora el rendimiento de los dispositivos de control ambiental.

**Figura 3.2** Incinerador RDF



Fuente TAKUMA, 2005 <http://www.takuma.co.jp/english/product/boiler/rdf/index.html>

Debe recordarse que la selección de un incinerador depende de las características de la comunidad a servir; esto incluye aspectos propios de la población como son los hábitos de consumo, la tecnología disponible y los recursos con que cuentan las autoridades para el manejo de RSM. Por lo tanto, un incinerador RDF es considerablemente más eficiente cuando se emplea en una población en la que se da la separación de residuos en fuente.

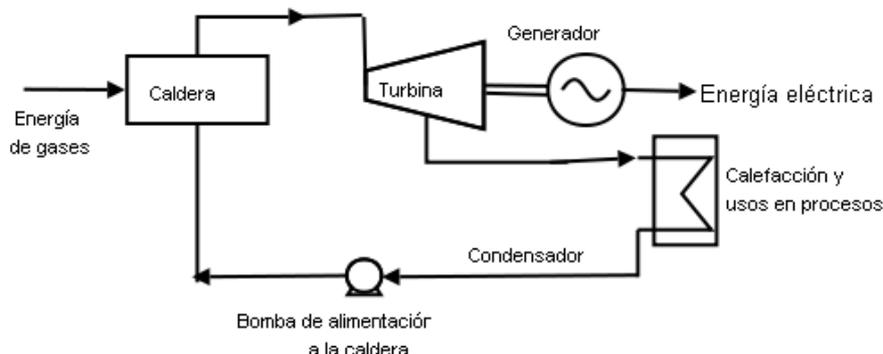
Además del tipo de combustible que emplean, los incineradores pueden o no contar con sistemas de recuperación de calor. Estos sistemas ayudan a sufragar los costos operacionales.

- Sistemas de recuperación de calor

Los sistemas de recuperación de calor constan de un intercambiador de calor que transfiere la energía de los gases de combustión a un fluido productivo (generalmente agua). Puede producirse agua caliente o vapor. El agua caliente se utiliza para aplicaciones industriales a baja temperatura o para calefacción central; el vapor es más versátil porque puede utilizarse para la generación de energía eléctrica.

Los componentes principales utilizados en los sistemas de recuperación de energía son calderas, turbinas, motores o generadores eléctricos. El sistema más utilizado en los incineradores de RSM es el esquematizado en la figura 3.3: el calor de los gases de combustión evapora el agua en una caldera y el vapor mueve la turbina para después volverse a condensar (Corey, 1990).

**Figura 3.3** Diagrama de recuperación de energía



### 3.3 Control de emisiones contaminantes

La incineración, como cualquier proceso, genera subproductos; en este caso gases y partículas contaminantes resultado de la combustión incompleta, y por lo tanto, el diseño del incinerador deberá incluir sistemas de control para estas emisiones.

En la tabla 3.1 se presenta un resumen de los contaminantes esperados del proceso de incineración, la razón por la que se producen, así como sus implicaciones para el ambiente y la salud.

**Tabla 3.1** Descripción de contaminantes

Nombre	Fuente	Efectos
Óxidos de nitrógeno	Térmicos.- Reacción del oxígeno y nitrógeno del aire. Prompt.- Nitrógeno en RSM y en combustible	Precusores de la formación del ozono Lluvia ácida Oxidante e irritante.
Dióxido de azufre	Azufre en los RSM o en el combustible	Irritación de ojos, nariz y garganta. Lluvia ácida.
Monóxido de carbono	Combustión incompleta de residuos orgánicos y combustible	Carboxihemoglobina
Dióxido de carbono	Combustión completa de residuos orgánicos y combustible	Gas de efecto invernadero.
Hidrocarburos no quemados, HC	Combustión incompleta de residuos y combustible	Dependen de su composición
Materia particulada: PST, PM10 y PM2.5	Combustión incompleta Arrastre de material no combustible	Reducción en la visibilidad Efectos en la salud según tamaño y composición
Metales pesados, cadmio, cromo, mercurio, plomo	Presencia de estos metales en los RSM.	Bioacumulación, envenenamiento
Gases ácidos (HF, HCl)	Presencia de flúor y cloro en los RSM (principalmente plásticos PVC, PE y PS)	Sustancias irritantes, corrosivas y tóxicas
Dioxinas y furanos	Combustión incompleta de RSM clorados	Propiedades cancerígenas

Fuente Tchobanoglous y Theisen, 1996

El control de los contaminantes depende de su estado físico y composición. Para los gases que son producto de combustión incompleta deberá aumentarse el tiempo y la temperatura para evitar que se formen, mientras que otros ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) tendrán que neutralizarse mediante reacciones químicas posteriores a la combustión.

- Control de CO y HC, dioxinas y furanos

El uso de oxígeno adicional y elevada temperatura (más de  $1000^\circ\text{C}$ ) permite completar la combustión y controlar la producción de estos contaminantes. Sin embargo esto favorecería la generación de  $\text{NO}_x$  térmico, por lo que es mejor incrementar el tiempo de residencia aumentando el número de cámaras de combustión (De Paul y Crowder, 1989).

- Control de  $\text{NO}_x$

El  $\text{NO}_x$  formado a partir de los compuestos orgánicos (prompt), así como los  $\text{NO}_x$  térmicos se controlan mediante una reducción química. Ésta, puede ser catalítica selectiva (RCS) o no selectiva (RNCS).

La RCS emplea la inyección de amoníaco en los gases de chimenea, seguido por el paso del gas sobre un catalizador (cobre, hierro, cromo, níquel o cobalto). El resultado de esta reacción es nitrógeno y vapor de agua; se necesita una temperatura de  $700$  a  $1200^\circ\text{C}$ . En la RNCS la inyección de amoníaco se realiza directamente al horno de combustión pudiendo llegar a formarse  $\text{NO}$  si la temperatura excede los  $1200^\circ\text{C}$ , este proceso tiene una eficiencia de control del 50 hasta 80%, mientras que el anterior alcanza el 90% (De Paul y Crowder, 1989).

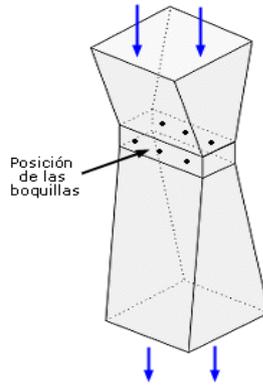
- Control de gases ácidos

Se puede prevenir la formación de  $\text{HCl}$  y  $\text{SO}_2$  separando los RSM que contengan grandes cantidades de cloro y azufre (como plásticos), pero esto reducirá el contenido energético de los residuos restantes. Por lo tanto se emplea un lavador de gases para su control.

El equipo esta formado por un lavador venturi, un desvaporizador, una solución de cal y un filtro prensa para deshidratar los lodos antes de su evacuación. Es necesario instalar un intercambiador de calor que primero enfríe los gases de combustión hasta  $32^\circ\text{C}$  antes del lavador (ver figura 3.4) y después los caliente para ser emitidos por la chimenea. Este sistema puede separar el  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  y  $\text{SO}_2$  con una eficiencia del 89 al 98%, 84 al 96%, 55 al 79%, respectivamente (De Paul y Crowder, 1989).

Este equipo, además de controlar gases ácidos, se emplea para el control de partículas. La diferencia de velocidad y presión que resulta de la constricción, hace que las partículas contaminantes que acompañan la corriente gaseosa se mojen, aumentando su peso y así, la reducción de la velocidad en la sección expandida del cuello permite que las gotas de agua en las que se disolvieron los gases ácidos y las partículas mojadas caigan, separándose del flujo de gas (Corey, 1990).

**Figura 3.4 Lavador de Venturi**



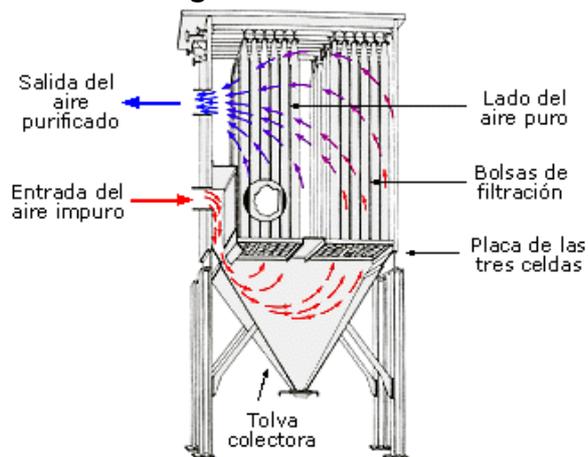
Fuente CEPIS, 2005

▪ Control de partículas

Las partículas mayores a  $10\ \mu\text{m}$ , se separan de los gases de combustión mediante cámaras de sedimentación, lavadores de venturi (ver figura 3.4) o ciclones; mientras que para partículas de menor diámetro, PM10, se emplean precipitadores electrostáticos (PES) o filtros bolsa (Tchobanoglous y Theisen, 1996).

Los PES son de alta eficiencia, pero su costo es elevado y su manejo requiere de personal calificado (Tchobanoglous y Theisen, 1996). En incineradores de RSM son de empleo mas frecuente los filtros bolsa o casa de bolsas (ver figura 3.5). En la casa de bolsas (baghouse), se emplean largas bolsas de material filtrante, colocadas verticalmente, a través de cuyas paredes pasan los gases de combustión y se retienen las partículas.

**Figura 3.5 Filtro bolsa**



Fuente CEPIS, 2005

Las partículas atrapadas forman una *torta* que permite filtrar partículas tan pequeñas como  $0.1\ \mu\text{m}$ , mucho más pequeñas que la distancia original entre las fibras de las bolsas ( $540$  a  $75\ \mu\text{m}$ ). Las bolsas se limpian mediante agitación mecánica o una corriente invertida de aire (Tchobanoglous y Theisen, 1996). Los parámetros de

diseño más importantes para este tipo de dispositivos son el área filtrante, el material y el método de limpieza del filtro. En las aplicaciones de incineración de RSM se han utilizado con éxito fibra de vidrio y teflón (Corey, 1990).

▪ Normas de emisión

La legislación ambiental mexicana considera como posible método de tratamiento de RSM y *residuos peligrosos* la incineración, y establece mediante la NOM-098-SEMARNAT-2004: *Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes*, lo siguiente:

- La operación de un incinerador debe ser realizada por personal calificado.
- Se debe contar con registros de la recepción, almacenamiento y material incinerado, incluyendo el monitoreo y medición de emisiones contaminantes.
- La temperatura mínima del horno de combustión deberá ser de 850°C, con un tiempo de residencia mayor a dos segundos.
- Las cenizas y otros residuos generados en el proceso se considerarán residuos peligrosos.
- El incinerador debe contar con sistemas de medición continua e indicadores de buenas prácticas de operación y control. Por lo menos, un equipo de monitoreo continuo de temperatura del horno y de emisiones de CO y O<sub>2</sub>.
- La vigilancia del cumplimiento de esta norma será realizada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (ProFePA) y los gobiernos locales, en el ámbito de sus respectivas competencias y atribuciones.
- Los límites máximos permisibles de emisiones son:

**Tabla 3.2** Límites máximos permisibles de emisiones

Contaminante	Límite de emisión mg/m <sup>3</sup>	Frecuencia de medición
CO	63	Continua
HCl	15	Trimestral
NOx	300	Semestral
SO <sub>2</sub>	80	Semestral
Partículas	50	Semestral
Arsénico, Selenio, Cobalto, Níquel, Manganeso, Estaño	0.7*	Semestral
Cadmio	0.07	Semestral
Plomo, Cromo total, Cobre, Zinc	0.7*	Semestral
Mercurio	0.07	Semestral
Dioxinas y furanos	0.2	Anual

\* Suma total de metales pesados

Todos los valores están referidos a condiciones estándar (1 atmósfera, base seca, 25°C y 7% de O<sub>2</sub>, de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994)

Fuente SEMARNAT, 2006

La existencia de esta norma demuestra que las autoridades mexicanas están conscientes del gran problema de la disposición de RSM en nuestro país, de que los espacios destinados a sitios de disposición final se están agotando y que la incineración ofrece una solución inmediata y eficaz para evitar su acumulación. Pese a ello, existe una gran oposición social a la construcción y puesta en marcha de un incinerador.

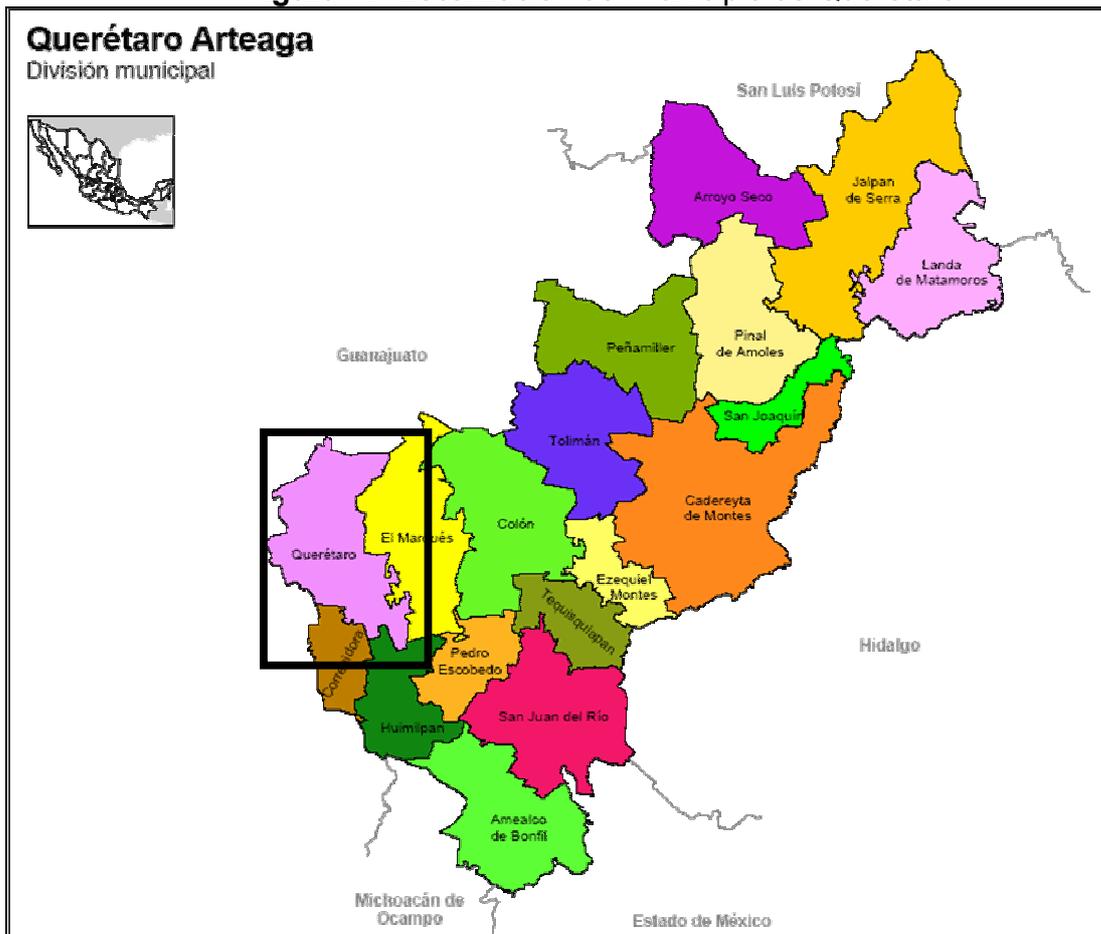
## CAPÍTULO 4. Caso de estudio: Municipio de Querétaro

En el presente capítulo se describe la situación actual del municipio de Querétaro en cuanto al manejo de residuos sólidos, con el fin de analizar el sistema y proponer posibles mejoras.

### 4.1 Consideraciones generales

El municipio de Querétaro es uno de los dieciocho municipios en los que se encuentra dividido el Estado de Querétaro de Arteaga (figura 4.1). Cuenta con una superficie de 707.3 km<sup>2</sup> que corresponde al 6.5% de la extensión total del Estado. Contiene 233 poblaciones, integradas en 7 delegaciones, 133 de las cuales son menores a 50 habitantes. La cabecera municipal es la ciudad de Santiago de Querétaro, considerada por la UNESCO desde 1996 como patrimonio cultural de la humanidad debido a su belleza y pasado cultural (Coordinación Estatal de Desarrollo Municipal, 2006).

Figura 4.1 Localización del municipio de Querétaro



Fuente INEGI, 2005

Las principales actividades en el Municipio son:

- Industria

El Municipio ha captado el mayor crecimiento industrial y de servicios del Estado. La zona industrializada abarca 896 hectáreas, divididas en cuatro parques industriales: Zona industrial Benito Juárez (450 ha), Parque industrial Querétaro (347 ha), Jurica (70 ha) y parque La montaña (20 ha).

De los 2,044 establecimientos industriales existentes, destacan por rama de actividad: la metalmecánica y la de autopartes, con 669 empresas; la de alimentos y bebidas procesadas con 598; la papelera, imprenta y editorial con 240 empresas, la química y la vidriera (Coordinación Estatal de Desarrollo Municipal, 2006).

- Comercio y Servicios

La actividad comercial ha tenido una tendencia clara de crecimiento en el municipio y aún más en la ciudad de Santiago de Querétaro. En el primer semestre del año 2002, el municipio contaba con 59 hoteles (de 1 a 5 estrellas) con un nivel anual de ocupación de 63.66%. Para el año 2006, en el mismo período, el nivel promedio de ocupación estaba arriba del 90% (Coordinación Estatal de Desarrollo Municipal, 2006).

- Agricultura y ganadería

El número de personal ocupado en agricultura y ganadería es de 4,261 habitantes, que representan el 1.7% de la población económicamente activa del municipio. La superficie total destinada a este sector es de 60,000 ha, siendo la mayor parte, 62%, tierras de agostadero (Coordinación Estatal de Desarrollo Municipal, 2006).

## **4.2 Sistema actual de manejo de RSM**

Con los datos obtenidos del Municipio y los disponibles en la red, se construyó el diagrama del manejo actual que se presenta en la figura 4.2. En el reporte que las autoridades municipales entregan a la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) del Estado de Querétaro, se establece que se recicla el 10% de lo recolectado (73.7 ton/día); sin embargo esto no es consistente, ya que al relleno sanitario llegan 716 ton/día y el total recolectado es sólo 736.92 ton/día. De acuerdo con datos del propio Municipio, el relleno sanitario no recibe RSM de ninguna otra procedencia.

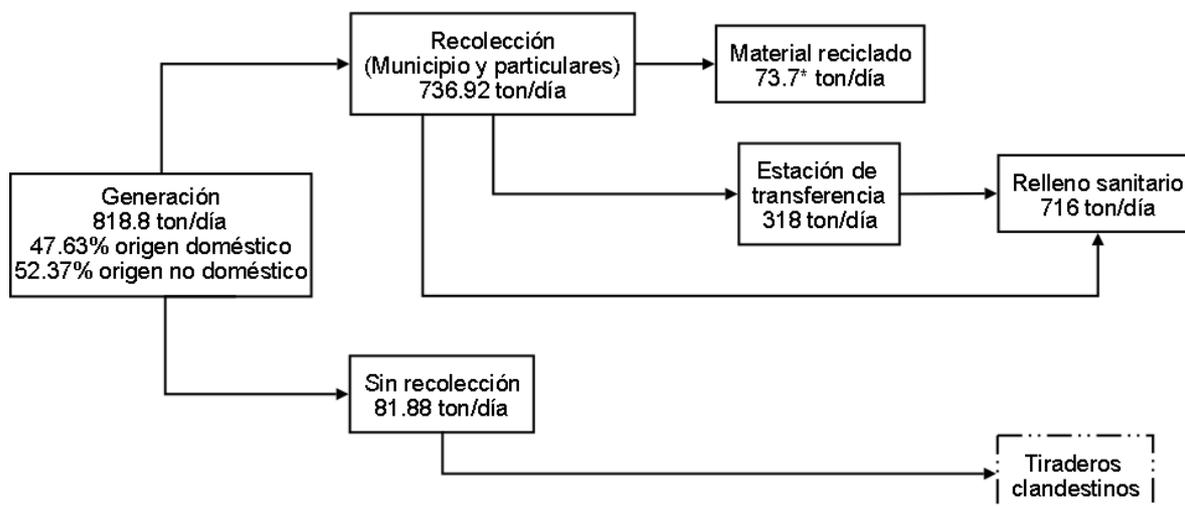
A continuación se analizan, una a una, las diferentes etapas del SIMRSM actual.

### **4.2.1 Generación y almacenamiento**

Los datos proporcionados por el Departamento de Logística y Planeación de la Secretaría de Servicios Públicos Municipales (Thesis Consulting, 2005), indican que

la generación de residuos es de 818.80 ton/día, de las cuales sólo 390.03 son de origen doméstico

**Figura 4.2** Manejo de los RSM



\* Dato inconsistente

Fuente SEDESU, 2008

Los RSM no domésticos son generados principalmente por el sector de producción de alimentos, bebidas y tabaco, 165.23 ton/día, seguido por la actividad comercial 90.67 ton/día (datos congruentes con el carácter turístico del Municipio). No se conoce la generación de RSM de otros sectores, pero se sabe que el municipio invierte diariamente 35,000 pesos en el barrido de la vía pública (ver tabla 4.1).

**Tabla 4.1** Fuentes no domésticas de generación de RSM

Sector	Subsector	Ton/día	
Industrial	Alimentos, bebidas y tabacos	165.23	
	Textiles e industria del cuero	3.11	
	Madera y sus productos	0.59	
	Papel, imprenta y editoriales	2.91	
	Productos derivados del petróleo y carbón	0.58	
	Química, plásticos y hules	8.50	
	Minerales no metálicos	13.62	
	Metálicas básicas	5.65	
	Metales, maquinario y equipo	14.67	
	Otras	0.16	
Servicios	Comerciantes y dependientes	90.67	
	Oficinistas	Información en medios masivos	0.14
		Servicios financieros y de seguros	0.30
		Servicios inmobiliarios y alquiler de bienes muebles	0.27
		Servicios profesionales	0.61
		Servicio de apoyo a los negocios	1.08
	Otros servicios	1.47	
	Restaurantes y bares	39.17	
Hoteles	3.22		

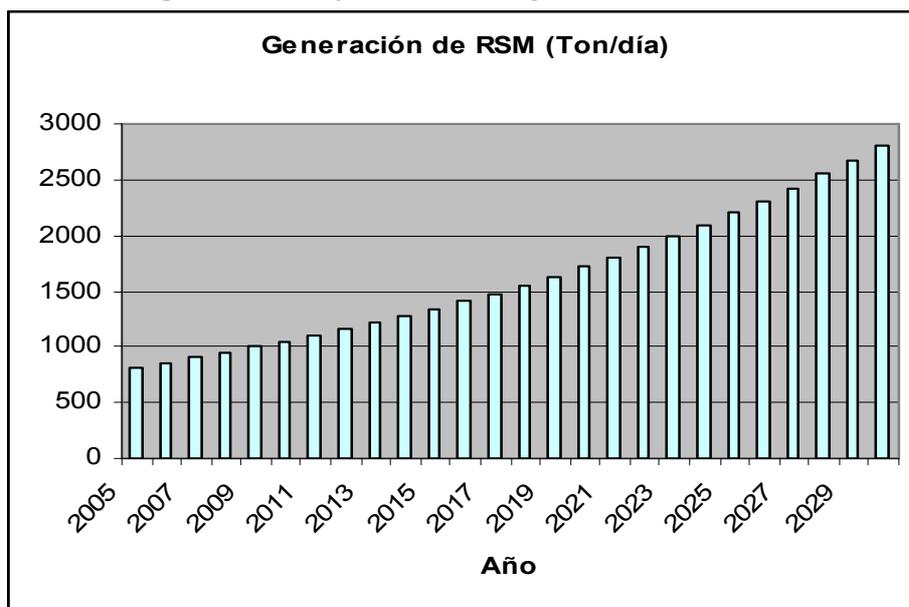
	Educación	11.40
	Médicos de consulta	0.48
	Médicos de hospitalización	2.66
	Transporte aéreo	0.45
	Transporte foráneo	31.19
Total		<b>398.11</b>

Fuente Thesis Consulting, 2005

La generación per cápita promedio en el 2005 era de 1.098 kg/día y se sabe que la tendencia en el incremento de la generación en nuestro país varía del 1% al 3% anualmente, dependiendo de la localidad (Medina y Jiménez, 2001).

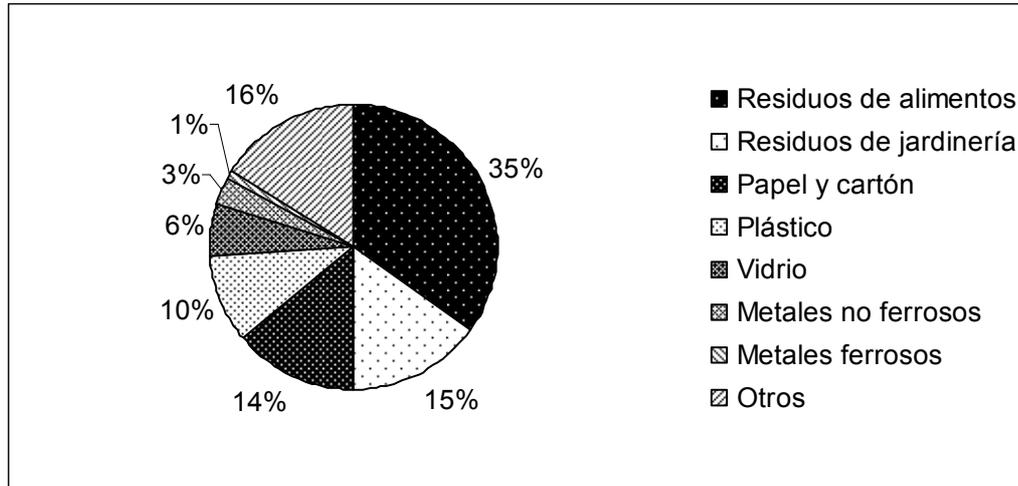
En el 2005, el Municipio contaba con una población de 745,189 habitantes, con una tasa de crecimiento poblacional del 2% (Thesis Consultig, 2005). Si se supone que el crecimiento poblacional se mantiene constante, y el incremento en la tasa de generación de RSM fuese la máxima estimada para el país, se puede calcular la cantidad de RSM a disponer en los próximos años (la figura 4.3 presenta la proyección al año 2030).

**Figura 4.3** Proyección de la generación de RSM



Además de la cantidad de RSM generada, es importante considerar su composición. En la figura 4.4 se muestra la composición porcentual de los RSM en el Municipio: el 50% es de residuos orgánicos (comida y jardinería) que podrían ser aprovechados para la obtención de biogás y composta; mientras que el 30% son materiales reciclables (papel y cartón, plástico y vidrio).

**Figura 4.4** Composición de RSM.



Fuente Thesis Consulting, 2005

No se tiene información precisa sobre el almacenamiento in situ (prácticas de almacenamiento doméstico o al interior de oficinas e industrias), pero se sabe que el Municipio cuenta con un total de 125 contenedores en áreas públicas: 10 de ellos ubicados en mercados, 2 en parques, 10 en vías públicas y 100 en edificios y escuelas.

#### 4.2.2 Recolección, transporte y transferencia

El equipo para la recolección municipal consta de 351 trabajadores y 62 vehículos: 47 camiones compactadores y 15 camiones de redilas. Todos los vehículos se emplean sólo al 75% de su carga y la recolección es de parada fija, tanto por entrega directa como por uso de contenedores. Las empresas y comercios particulares contratan servicios de recolección, también particulares, de los que no se conoce el número de vehículos, ni personal contratado. En la tabla 4.2 se enlistan las empresas prestadoras de servicio autorizadas.

**Tabla 4.2** Empresas de recolección de RSM

Empresa o razón social	Tipo de residuos que recolectan
Ana Laura Velásquez Pérez	Papel, cartón, plástico, residuos de jardinería, fierro y madera.
Derivados metálicos de Querétaro	Papel, cartón, plástico, vidrio, residuos de comida, residuos de jardinería, madera, llantas, pacas de unicel y poliuretano.
Ecosafe	Papel, plástico, vidrio, residuos de comida, residuos de jardinería, polvo de granalla proveniente de Funditec.
Fierro Comercial Díaz	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería, madera, llantas, lodos no peligrosos provenientes de Spicer.
Ing. Arturo González Gutiérrez	Papel, plástico, residuos orgánicos, residuos de jardinería, lodos no peligrosos de Van-Can.
Mexicana del Medio Ambiente Querétaro Limpio	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería.
Querétaro Limpio	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería,

	madera, llantas, hule.
Recolección y reciclaje de Residuos Industriales	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería
Recolectora King Kong	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería, madera, fierro, aluminio, llantas.
Recolección Ecológica de Querétaro	Papel, cartón, plástico, residuos de comida.
SERECO	Papel, plástico, cartón, vidrio, residuos de comida, residuos de jardín
Transportadora de Querétaro	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería, fierro, llantas.
Trisa Comercial	Papel, cartón, plástico, residuos de comida, residuos de jardinería.
Víctor Becerril Ramos	Poliol e isocianato que provienen de Mabe

**Fuente** Thesis Consulting, 2005

Se estima que se recolecta el 90% del total de la basura generada, entre gobierno y particulares. En la zona centro (residencial, turística e industrial) la basura se recolecta diariamente, mientras que en las zonas rurales y comerciales la recolección se realiza cada tercer día (SEDESU, 2008).

El municipio cuenta con una estación de transferencia de descarga directa (ver figura 4.5), donde se compactan los residuos para su traslado al sitio de disposición final. Posee una capacidad de 318 ton/día, lo que representa menos del 40% de la basura generada (SEDESU, 2008). El resto de la basura recolectada se lleva directamente al sitio de disposición.

Del total de los RSM recolectados, se estima que menos del 10% (73.7 ton/día) se reciclan actualmente (SEDESU, 2008). La SEDESU afirma que existen centros de acopio de materiales y se presume que los particulares que prestan servicios de recolección reciclan ciertos productos. Sin embargo, la estimación del porcentaje de materiales reciclados mencionada anteriormente no es consistente con la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario

**Figura 4.5** Estación de transferencia del municipio de Querétaro



**Fuente** SEDESU, 2008

### 4.2.3 Disposición final

El sitio para la disposición final es un relleno sanitario de 20 ha, que está a cargo de la empresa Mexicana del Medio Ambiente. En febrero de 1996 inició su operación y fue proyectado para una vida útil de 15 años; sin embargo, se han realizado modificaciones al proyecto original para ampliar dicho periodo (figura 4.6).

**Figura 4.6** Relleno sanitario del municipio de Querétaro



Fuente SEDESU, 2008

El relleno se encuentra al noroeste de la Ciudad de Querétaro, a una distancia aproximada de 15 km del centro y 6 km del límite de la mancha urbana, en una barranca formada por lomerío.

El Departamento de Logística y Planeación de la Secretaría de Servicios Públicos Municipales reporta que llegan en promedio al relleno sanitario 716 ton/día, lo que representa sólo el 87% del total generado y el 97% del recolectado. Es posible deducir que el trece por ciento de la generación de RSM del Municipio se dispone clandestinamente en tiraderos y que las 22 ton/día (3%) recolectadas que no llegan al relleno son separadas en algún punto entre el sitio de recolección y el de disposición final (SEDESU, 2008).

### 4.3 Análisis del sistema de manejo de RSM actual

En el 2006, el municipio de Querétaro se convirtió en el tercer municipio a nivel nacional en obtener el certificado en el manejo de los residuos sólidos urbanos ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (ProFePa). Lo que garantiza que existen buenas prácticas en el manejo de los mismos. Sin embargo, es posible identificar diversas oportunidades de mejora en el sistema de manejo actual; éstas son:

➤ Reducir la tasa de generación per capita

La minimización de residuos sólidos de origen doméstico se logra con la participación ciudadana en acciones tan simples como la realización de *compras inteligentes*. Esto

consiste en planificar las compras para no adquirir más de lo necesario, preferir productos a granel para evitar materiales de empaque, no comprar productos cuyo empaque sea excesivo, no emplear bolsas de plástico desechables para transportar la mercancía y no comprar productos en envases desechables (Aguirre et al, 2001).

Para reducir la cantidad de residuos producto de las industrias, la implantación de sistemas de producción como el *JIT* (por sus siglas en inglés: just in time), es recomendable. El sistema *JIT* consiste en producir la cantidad exacta de artículos requeridos cuando los clientes lo demanden, evitando desperdicios; además de gestionar desde la adquisición de materia prima hasta la entrega del producto terminado, lo que garantiza que sólo se producirá lo que se va vender. Aparte del sustancioso ahorro económico al eliminar almacenes de materia prima y de producto, los empresarios obtienen un mejor aprovechamiento de sus recursos.

➤ Elevar el porcentaje de utilización de vehículos de recolección

La capacidad de carga empleada actualmente en el municipio, 75%, es baja, por lo que se recomienda rediseñar las rutas de recolección para aumentarla.

El costo actual por tonelada de residuos recolectada es de \$604.24 (SEDESU, 2008), lo cual incluye el precio del combustible y el salario de las cuadrillas de recolección. Al aumentar la carga porcentual se aumentaría ligeramente el combustible empleado, pero se abatiría el tiempo empleado de recolección y por tanto los gastos salariales.

➤ Aprovechar los residuos orgánicos

Los restos de alimentos y de jardinería constituyen el 50% del total, y se podrían aprovechar en un biodigestor para la obtención de biogás, o bien en compostaje. Esto, además de producir un combustible alternativo o composta, permitiría prolongar la vida útil del relleno sanitario.

➤ Reciclaje

Como se observa en la tabla 4.2, existen empresas que pueden comprar material de reciclaje. Si se separan los residuos de origen doméstico desde la fuente, sería éste un mercado atractivo para quienes se dedican al reciclaje de materiales; por otro lado, al disminuir la cantidad de residuos que lleguen al relleno, se ahorra espacio.

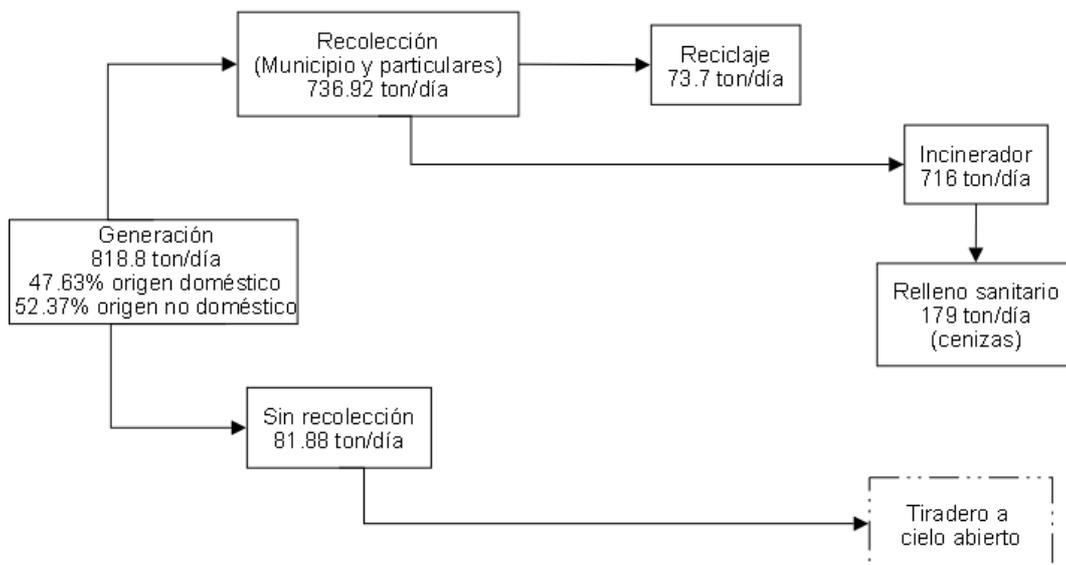
Para finalizar, el cuidado del ambiente está ligado al ahorro y aprovechamiento máximo de los recursos, mismos que se traducen en ahorros económicos. Si se toman medidas para remediar los daños ya ocasionados a la naturaleza, se incurre en elevados costos ambientales e importantes erogaciones económicas.

## CAPÍTULO 5. SIMRSM-Qro

A partir de las consideraciones ambientales y técnicas del proceso de incineración presentadas en el capítulo anterior, en éste se propone el diseño e inclusión de un proceso de incineración dentro del sistema de manejo integral de RSM del municipio de Querétaro. Como punto inicial se describen las características de un proceso de incineración considerando que todos los residuos que actualmente llegan al relleno sanitario serían incinerados y se evalúan las ventajas ambientales. Posteriormente, se plantea la mejora del SMIRSM considerando minimización y reciclaje.

En la figura 5.1 se presenta el SIMRSM-Qro, considerando que el incinerador sustituiría al *relleno sanitario* como disposición final (figura 4.2 modificada). Es prudente aclarar que el relleno sanitario se seguirá empleando, pero sólo para la disposición de las cenizas producto de la incineración (alargando considerablemente el tiempo de vida porque el espacio requerido disminuye un 90%). Las cenizas también podrían ser aprovechadas como material de cubierta en otros rellenos o como material de construcción.

**Figura 5.1** Introducción de la incineración en el SMIRSM-Qro.



Para aprovechar la energía generada y disminuir los costos de operación del incinerador, se considera la producción de energía eléctrica por medio de vapor.

### 5.1 Aspectos técnicos

En esta primera aproximación se considera que todos los residuos que actualmente llegan al relleno sanitario de Querétaro serán incinerados; esto con el fin de comparar directamente los costos y beneficios ambientales de ambos métodos de

disposición final, así como para mostrar los criterios de selección que deben seguirse en el diseño de un equipo de incineración.

### 5.1.1 Caracterización de residuos a incinerar

El 50% de los residuos generados en el municipio de Querétaro son residuos de comida y de jardín (figura 4.4), que además de poseer un poder calorífico bajo, tienen un gran contenido de humedad. Esto implica la necesidad de emplear combustible adicional para llevar a cabo la incineración, además de reducir el calor recuperado para la obtención de energía eléctrica.

Por otro lado, el 14% de los RSM es papel y cartón, y el 10% son plásticos, los cuales poseen un poder calorífico alto (ver tabla 5.1) compensando parcialmente los requerimientos de combustible adicional.

**Tabla 5.1** Poder calorífico de los RSM

Tipo de residuos		Recolectados kcal/kg	Secos kcal/kg
Residuos de alimentos	Grasas	8.964	9.148
	Comida mezclada	0.998	3.324
	Fruta	0.948	4.452
	Carne	4.235	6.919
Papel y cartón	Cartón	3.912	4.127
	Revistas	2.919	3.043
	Periódico	4.431	4.713
	Papel mezclado	3.777	4.206
	Cartón encerado	6.292	6.513
Plásticos	Plásticos mezclados	7.834	7.995
	Polietileno	10.382	10.402
	Poliestireno	9.122	9.140
	Poliuretano	6.224	6.237
	Policloruro de vinilo	5.419	5.430
Textiles, goma y cuero	Textiles	4.422	4.913
	Goma	6.050	6.123
	Cuero	4.167	4.467
Residuos de jardinería	Residuos de jardín	1.444	3.613
	Madera verde	1.167	2.333
	Madera dura	4.084	4.464
	Madera mezclada	3.689	4.620

Fuente Tchobanoglous y Theisen, 1996

### **5.1.2 Selección del tipo de incinerador**

Como se mencionó anteriormente, el incinerar residuos orgánicos húmedos representa gastos adicionales en la operación del incinerador, por lo que es aconsejable no incinerarlos y aprovecharlos separadamente para la producción de composta o biogás. Sin embargo, considerando las condiciones actuales de manejo de RSM en el Municipio, se seleccionará un incinerador capaz de destruir todos los RSM que hoy llegan al relleno sanitario.

Debido a la generación per capita y el aumento de ésta año con año, se recomienda un incinerador de RSM no preseleccionados con exceso de aire, con una capacidad de hasta 2,000 ton/día (Knauf-Group, 2008). En la etapa inicial el incinerador operaría con 716 ton/día y sólo alcanzaría su capacidad nominal hasta 15 años después (ver figura 4.3), si es que no se implantan programas de minimización y reciclaje.

En cuanto el sitio de instalación, se recomienda en la actual estación de transferencia, disminuyendo así gastos por transporte.

Para controlar las emisiones contaminantes se recomienda el uso de un filtro de bolsas para las cenizas volantes y un lavador de gases para los gases ácidos; mientras que para la prevención de dioxinas y furanos, se debe garantizar la operación a temperaturas mayores a 1,000°C (ver sección 3.3).

## **5.2 Análisis costo-beneficio ambiental**

Con el objetivo de comparar los daños y beneficios ambientales ocasionados por el incinerador y el relleno sanitario, se hace uso de la metodología descrita en la sección 2.2 del presente trabajo.

En la tabla 5.2 se presenta la primera de las matrices de impacto; esto es, la matriz de identificación, en la que se indica mediante una cruz los posibles impactos durante las etapas de construcción, operación y cierre de los dos proyectos analizados: disposición de los RSM en un relleno o en incinerador.

### **5.2.1 Criterios de evaluación de impacto**

Los impactos asociados con cada método de disposición analizado deben ser cuantificados, y para eso se empleó una escala de -3 a +3, correspondiendo el valor más negativo al efecto más adverso posible y el más positivo a un efecto muy benéfico sobre el ambiente o la salud.

**Tabla 5.2** Matriz de identificación de impacto ambiental

Impacto \ Actividad	Construcción		Operación		Cierre	
	RS	I	RS	I	RS	I
Valor de la propiedad			X	X	X	X
Necesidad de espacio	X	X	X	X	X	X
Cambio en el paisaje	X	X	X	X	X	X
Generación de ruido	X	X	X	X		
Generación de olores			X	X	X	
Proliferación de fauna nociva			X	X		
Generación de empleos	X	X	X	X	X	X
Uso del suelo	X	X	X	X	X	X
Contaminación del suelo	X	X	X	X	X	X
Emisiones de compuestos de azufre	X	X	X	X	X	
Emisiones de NO <sub>x</sub>	X	X		X		
Emisiones de CO	X	X		X		
Emisiones de CO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X	
Emisiones de CH <sub>4</sub>			X		X	
Emisiones de PST	X	X	X	X	X	
Contaminación de mantos freáticos			X		X	
Tiempo de eliminación de los residuos			X	X		
Generación o pérdida de algún bien			X	X	X	
Distancia entre generación y disposición			X	X		
Necesidades de mantenimiento			X	X	X	

RS = Relleno sanitario

I = Incinerador

A continuación se explica el significado de cada uno de los criterios identificados en la matriz anterior y el valor asignado dentro de la matriz de evaluación (tabla 5.3). La tabla completa de valores se presenta como anexo.

- Valor de la propiedad.- El devaluó de la propiedad se debe al rechazo que la población pueda sentir por un sitio de disposición final.

Se sabe que los terrenos aledaños al relleno sanitario han sufrido una devaluación del 10 al 15% (Ayuntamiento de Querétaro, 2008). En cambio, el incinerador no afectaría el valor comercial de los terrenos aledaños porque se construiría en el sitio que hoy ocupa la estación de transferencia (los valores asignados fueron -3 y 0, respectivamente).

- Necesidades de espacio.- Considera la pérdida de espacio requerido para el desarrollo de la comunidad a corto (hasta 3 años), mediano (3-5 años) y largo plazo (más de 5 años).

El relleno sanitario de Querétaro está construido en una barranca formada por lomerío; este tipo de terrenos son irregulares, por lo que no son tomados en cuenta para la construcción de infraestructura (-1). El incinerador no requiere gran espacio, además que es recomendable instalarlo en el sitio actual de la estación de transferencia (0).

- Cambio en el paisaje.- Se considera el impacto estético sobre el paisaje. Para los dos casos considerados el efecto es negativo. El incinerador deteriora el paisaje por la continua emisión de gases por su chimenea (-2) y el relleno sanitario lo deteriora por la gran extensión de terreno y el movimiento de camiones y maquinaria (-2, en construcción y operación). Después de algunos años, el suelo del relleno sanitario se vuelve fértil debido a la materia orgánica ahí depositada y se convierte en un extensa área verde, agradable a la vista, pero inútil para el cultivo, ganadería o construcción (+2).
- Generación de ruido.- Este criterio es por definición negativo, ya que ninguno de los proyectos considerados es capaz de funcionar como amortiguador del ruido.

En la construcción de ambos sitios se considera que producen el mismo nivel de ruido (-2). Para la operación, ambos sitios ocupan maquinaria, pero el ruido sólo es perceptible en las inmediaciones del lugar (-1).

- Generación de olor.- Aunque la compactación de residuos y el material de cubierta en el relleno sanitario disminuyen considerablemente los olores, se emiten gases productos de la descomposición que pueden emigrar a las comunidades aledañas (-1). El incinerador posee cámaras que se encuentran a presiones negativas, por lo que se elimina la posibilidad de emitir malos olores (0).
- Proliferación de fauna nociva.- Criterio negativo.

Con un buen manejo del sitio de disposición, no tendría porque generarse fauna nociva. Sin embargo en el manejo del relleno sanitario es más probable su existencia debido a que durante el tiempo de espera entre la descarga de cada vehículo, los residuos quedan al descubierto, lo que pudiera atraer moscas, cucarachas o ratas; pero no es un buen ambiente para su proliferación (-1). Por su parte, en el incinerador existe una elevada temperatura por lo que no cabe la posibilidad de la existencia de fauna nociva (0).

- Generación de empleos.- Se determina si la instalación y operación del sitio puede o no generar empleos.

La construcción de ambos sitios de disposición final aumenta el número de personas empleadas temporalmente (+3). En operación son pocas las personas que laboran dentro del relleno y del incinerador; en el primero no se necesita mano de obra calificada (+1) y en el segundo es necesaria la contratación de personal especializado (+2). Se considera que es más benéfico la creación de empleos calificados porque aumenta el desarrollo tecnológico del país.

Cuando un incinerador se cierra, afecta de manera negativa ya que las pocas personas que laboraron allí se quedan sin empleo (-2). El relleno sanitario, después de que es clausurado, necesita vigilancia y mantenimiento, por lo menos 20 años más, por lo que genera un menor número de desempleados (-1).

- Uso del suelo.- Ya que ninguno de los proyectos contempla la *recuperación* de suelos, sólo se califica este criterio con valores negativos y con base en el área requerida para el sitio de disposición final.

El incinerador es totalmente favorecido debido a que, en promedio, el área requerida para una planta de incineración es de 80 x 20 m (Knauf Group, 2008), en cambio un relleno sanitario requiere hectáreas completas. Esto representa la principal e inmediata ventaja del incinerador sobre el relleno (-1 y -3, respectivamente).

- Contaminación del suelo.- Los valores considerados son negativos ya que los proyectos considerados no *sanearán* el sitio de instalación. En ambos casos la construcción y operación pueden contaminar el suelo.

El incinerador es una construcción industrial y como tal requiere cimentación (-1). Como ya se dijo, el relleno sanitario requiere de una gran extensión de terreno, que debe ser cubierta por una geomembrana (-2). Durante la operación ninguno de los dos procesos debe contaminar el suelo (0), aunque en el relleno existen más probabilidades de que esto ocurra (rompimiento de geomembrana). Finalmente, al cierre, el suelo del incinerador se recupera (0), pero en el relleno sanitario pasarán muchos años (50 o más) antes de que los contaminantes del sitio se estabilicen (-3).

- Emisiones de compuestos de azufre, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> y PST. Todas las emisiones que se producen se consideran contaminantes y por tanto los valores de este criterio son sólo negativos.

En la construcción del incinerador y relleno, las emisiones esperadas son partículas, por el movimiento de tierra y materiales de construcción y gases de combustión de la maquinaria empleada (-2).

Para su operación, el incinerador cuenta con sofisticados equipos de control que garantizan captar arriba del 90% del total de las emisiones (-1), excepto CO<sub>2</sub> por ser el producto deseado. El relleno sanitario, por el contrario, no cuenta con ningún sistema de control y el biogas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y compuestos de azufre), producto de la degradación de los residuos orgánicos serán emitidos a la atmósfera aún después del cierre (-3, -3 y -2, respectivamente).

- Contaminación de mantos freáticos.- Analiza la posibilidad de contaminación de corrientes y depósitos subterráneos por descargas de lixiviados.

La geomembrana del relleno sanitario del municipio de Querétaro es tepetate, material de baja permeabilidad (10<sup>-5</sup> cm/s, SCS Engineers, 2005) por lo que es difícil que exista contaminación de aguas subterráneas (-1). En el incinerador no existe la posibilidad de que se contamine el subsuelo (0).

- Tiempo de eliminación de los residuos.- Considera el posible aumento en la rapidez de eliminación de los RSM y se asignan valores positivos.

En el relleno sanitario la degradación de RSM es lenta (+1), mientras que en el incinerador la destrucción de estos es de unos cuantos minutos (+3).

- Generación o pérdida de algún bien.- Este criterio considera la oportunidad de aprovechar algún bien producto de la degradación de los RSM.

El incinerador es capaz de producir energía térmica directamente aprovechable (+3). En el relleno sanitario se emite biogás a la atmósfera y para aprovecharlo se requiere de infraestructura de captación y tratamiento (-3).

- Distancia entre generación y disposición.- Entre mayor sea la distancia es mayor el daño ambiental por la quema de combustibles para realizar el transporte de RSM.

Es recomendable que el incinerador esté cerca de la fuente de generación, se recomienda el sitio que actualmente ocupa la estación de transferencia (-1). El recorrido de los camiones recolectores es mayor a 10 km (-3).

**Tabla 5.3** Matriz de evaluación de impacto ambiental

Actividad	Impacto		Construcción		Operación		Cierre		Total	
	RS	I	RS	I	RS	I	RS	I	RS	I
Valor de la propiedad			-3	0	-3	0	-6	0	-6	0
Necesidad de espacio	-1	0	-1	0	-1	0	-3	0	-3	0
Cambio en el paisaje	-2	-1	-2	-2	+2	-1	-2	-1	-2	-4
Generación de ruido	-2	-2	-1	-1			-3	-3	-3	-3
Generación de olores			-1	0	-1		-2	0	-2	0
Proliferación de fauna nociva			-1	0			-1	0	-1	0
Generación de empleos	+3	+3	+1	+2	-1	-2	3	3	3	3
Uso del suelo	-3	-1	-3	-1	-3	-1	-9	-3	-9	-3
Contaminación del suelo	-2	-1	0	0	-3	0	-5	-1	-5	-1
Emisiones de compuesto de azufre	-2	-2	-2	-1	-2		-6	-3	-6	-3
Emisiones de NO <sub>x</sub>	-2	-2		-1			-2	-3	-2	-3
Emisiones de CO	-2	-2		-1			-2	-3	-2	-3
Emisiones de CO <sub>2</sub>	-2	-2	-3	-3	-3		-8	-5	-8	-5
Emisiones de CH <sub>4</sub>			-3		-3		-6	0	-6	0
Emisiones de PST	-2	-2	-1	-1	-1		-4	-3	-4	-3
Contaminación de mantos freáticos			-1		-1		-2	0	-2	0
Tiempo de eliminación de los residuos			+1	+3			1	3	1	3
Generación o pérdida de algún bien			-2	+3	-2		-4	3	-4	3
Distancia entre generación y disposición			-3	-1			-3	-1	-3	-1
Necesidades de mantenimiento			-2	-3	-2		-4	-3	-4	-3
							<b>Total</b>		<b>-68</b>	<b>-23</b>

- Necesidades de mantenimiento.- Como cualquier proyecto de ingeniería se requiere de mantenimiento y por lo tanto de recursos económicos para el mismo. Por esto, sólo se considera valores negativos.

En operación, el mantenimiento del relleno es relativamente sencillo (-2), mientras que el incinerador requiere de técnicos especializados (-3). Posterior al término de su vida útil el relleno continúa requiriendo de supervisión y mantenimiento (-2).

### 5.2.2 Costo ambiental

Para asignar un costo económico a los criterios evaluados en la matriz anterior se empleó el concepto de externalidades descrito en el capítulo 2 de esta tesis (ver 2.2.2). De los veinte criterios empleados en la tablas 5.2 y 5.3 sólo se conocen valores de externalidad para cuatro: emisiones de compuestos de azufre (SO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>.

- Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>

En el momento de realización de este trabajo, el valor de emisión asignado internacionalmente a estos gases, por ser de efecto invernadero era, para una tonelada de dióxido de carbono de 18.5 euros (276.3 pesos; BM, 2008) y para el valor del metano 21 veces mayor (BANCOMEXT, 2008).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> del incinerador, cuando se disponen 3.71x10<sup>6</sup> ton de RSM (generación de quince años; ver fig 4.3), se estimó a partir de los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés). El factor usado es igual a 153 kg/ton de RSM para incineradores en bruto con equipo de control (US-EPA, 1995).

El total de emisiones de CO<sub>2</sub> será de 567,630 ton y el costo de externalidad asociado alcanzará los 156.84 millones de pesos.

Por otra parte, suponiendo que una tonelada de RSM genera 60m<sup>3</sup> de biogás (Rosiles, 2008), es posible calcular la cantidad y costo del CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> emitidos por la disposición de residuos en un relleno sanitario (tabla 5.4).

**Tabla 5.4** Composición típica del biogás y costo de externalidades

Componente	% en volumen	Volumen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Masa (Ton) <sup>1</sup>	Costo (10 <sup>6</sup> pesos)
Dióxido de carbono	40-50	100.17	180,306	49.82
Metano	45-55	111.30	72,345	419.77
Nitrógeno	2-3	6.67	-	-
Sulfuro de hidrógeno	1-2	4.45	-	-
Hidrógeno	<1	-	-	-
Oxígeno	<1	-	-	-

<sup>1</sup> A temperatura de 25°C y presión de 1 atm

Fuente Kiss y Aguilar, 2007

- Emisiones de compuestos de azufre (SO<sub>2</sub>) y NO<sub>x</sub> Para determinar el costo asociado con estos contaminantes, se calculó la emisión de los mismos durante el proceso de incineración, a partir de los factores de emisión de la EPA y los costos unitarios de externalidad propuestos por DEFRA (Ver sección 2.2, Costo ambiental).

De los valores expuestos en la tabla 2.3, se toma el valor promedio, es decir, una tonelada de SO<sub>2</sub> es equivalente a \$ 36,503.04; mientras que una tonelada de NO<sub>x</sub> lo es a \$11,519.24. Como dichos costos están referidos al año 2003, es necesario actualizarlos al presente año por medio de la siguiente fórmula:

$$F_n = VP(1 + i)^n$$

Fuente Sapag, 1998

Donde *VP* corresponde al valor de las libras en el 2003, *n* = 5 porque es el número de años transcurridos del 2003 hasta la fecha e *i* es la tasa de devaluación promedio de la libra, que es del 5% (Banco de Inglaterra, 2008). Sustituyendo los datos anteriores en ambos casos, se tiene que el valor de una tonelada de SO<sub>2</sub> en 1993 (\$36,503.04) es equivalente a \$46,588.02; mientras que el valor actual (2008) de una tonelada de NO<sub>x</sub> es de \$14,701.84

En la tabla 5.5 en donde se presenta los costos de externalidad asociados con la incineración de las 3.71x10<sup>6</sup> ton de RSM empleadas como base de comparación.

El mismo procedimiento se sigue para actualizar los valores de la tabla 2.4, pero ahora *n*= 15, *i*= 9% (BM, 2008).

**Tabla 5.5** Costo de externalidades

Contaminante	Factor de emisión <sup>a</sup> (kg/ton de RSM)	Emisión total (ton)	Costo externalidad (pesos/ton)	Costo total (10 <sup>6</sup> pesos)
SO <sub>2</sub>	0.30	1,113	46,588 <sup>b</sup>	51.85
			66,935 <sup>c</sup>	74.50
NO <sub>x</sub>	1.10	4,081	14,701 <sup>b</sup>	59.99
			27,027 <sup>c</sup>	110.30

a) US-EPA, 1995

b) Turner Guy, Handley D, Newcombe J, Ozdemiroglu E, 2004

c) Rosado y Tovar, 2003

Aunque se sabe de otros costos como lo son la construcción, operación y mantenimiento del relleno sanitario e incinerador, no se pueden utilizar para determinar la equivalencia impacto costo debido a que son costos que no reflejan el daño ambiental que el sitio de disposición provoca. Claro ejemplo de ello es el costo de adquisición del terreno, el Municipio pagó a ejidatarios por 20 ha un millón de pesos; pero este costo no toma en cuenta que ese suelo perderá sus características originales.

En la tabla 5.6 se resumen los costos de externalidades conocidos junto con su valor en la matriz, de donde un punto de la matriz equivale a 61.03 millones de pesos.

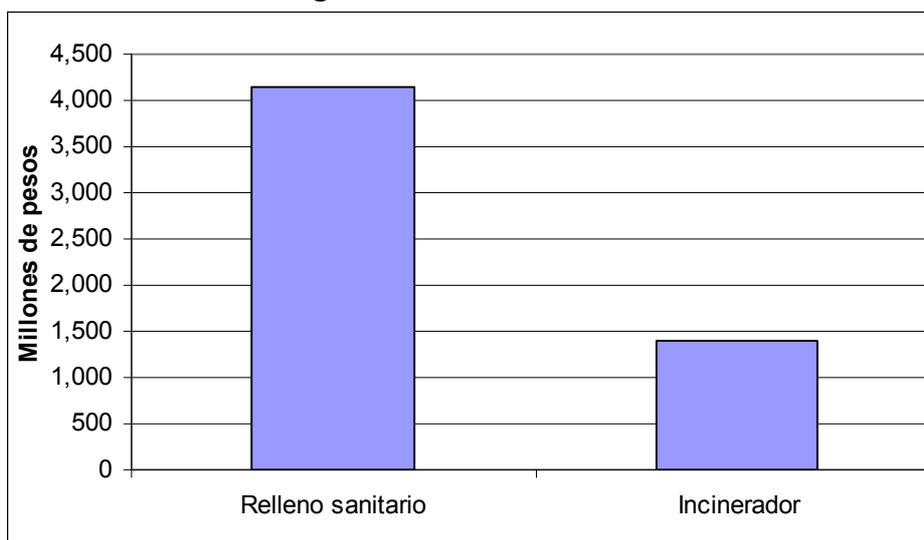
**Tabla 5.6** Equivalencia impacto-costo

Emisiones	Costo total (10 <sup>6</sup> pesos)	Valor de impacto	Valor I/C (10 <sup>6</sup> pesos)
CH <sub>4</sub>	419.77	(-3)+(-3)	69.96
CO <sub>2</sub> relleno	49.82	(-3)+(-3)	8.30
CO <sub>2</sub> incinerador	156.84	-3	52.28
SO <sub>2</sub>	51.85	-1	51.85
	74.50	-1	74.50
NO <sub>x</sub>	59.99	-1	59.99
	110.30	-1	110.30
<b>Valor promedio</b>			61.03

Teniendo el valor I/C, sólo resta transformar los puntos de la matriz a valor económico. Lo anterior se consigue multiplicando el total de puntos del relleno sanitario y del incinerador por I/C:

- El relleno sanitario (-68 puntos) ocasiona un daño al ambiente por 4,150 millones de pesos.
- El incinerador (-23 puntos) ocasiona un daño al ambiente por 1, 403 millones de pesos.

**Figura 5.2** Costo ambiental

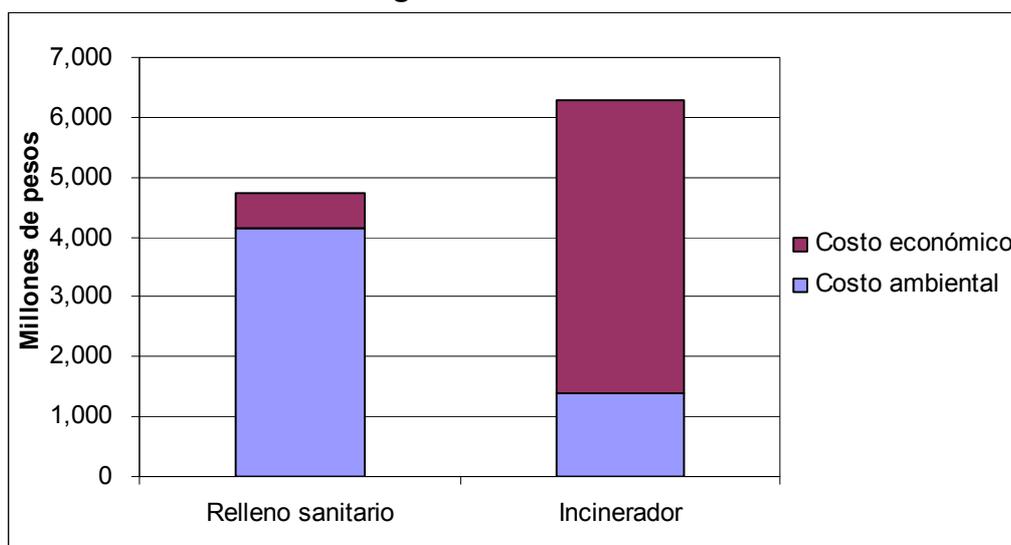


El costo de la disposición en sitio en el relleno es de \$156 (Ayuntamiento de Querétaro, 2008); mientras que incinerar una tonelada de residuos generados en el Municipio es de \$1318.77 (Yarto, 2006).

Para establecer una relación entre costos del relleno e incinerador, se considera el total de residuos que se pueden disponer en el relleno (3,710,011.43 ton). El costo de disponer dicha cantidad en el relleno es de 578. 76 millones de pesos; mientras que el costo por la misma cantidad en el incinerador es de 4,892 millones.

En la figura 5.3 se muestra el costo total (ambiental y económico) de los dos sitios de disposición final.

**Figura 5.3 Costo total**



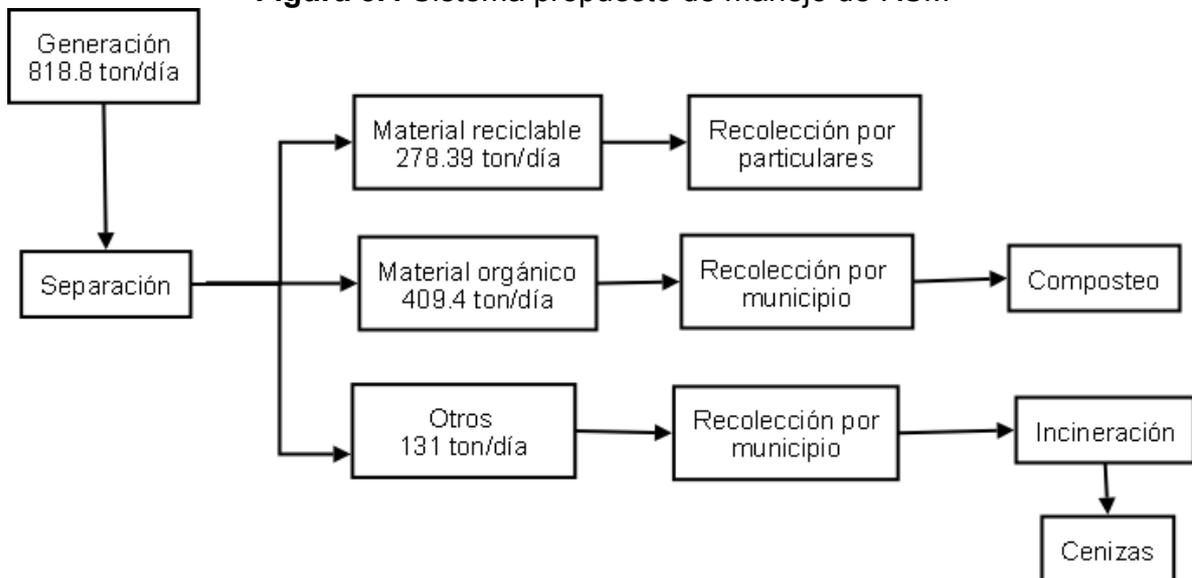
Como se había dicho en la introducción de esta tesis, la incineración es de 10 a 15 veces más cara que el relleno; pero cuando se toma en consideración el daño ambiental que ocasionan ambos tipos de disposición, el incinerador es la mejor opción. Se juzga pertinente resaltar la crisis en la que nuestro planeta se encuentra debido a la contaminación por residuos sólidos. Cada día estamos más próximos al momento en que nuestra existencia se ve amenazada por la cantidad de residuos acumulados ya que los actuales métodos de disposición (rellenos sanitarios) son incapaces de eliminar los residuos con la misma rapidez que se producen.

Sin embargo, el incinerador no resuelve el problema de los residuos sólidos de raíz. Es impostergable la implementación de acciones y programas que vayan orientados a la minimización de la tasa de generación de RSM.

### 5.3 Propuesta integral

Si se cuenta con programas de separación de residuos, el sistema mostrado en la figura 5.1, es susceptible de varias mejoras que se resumen en la figura 5.4, mismas que impactarían determinantemente en la disminución de costos por la disposición de RSM y se protegería al ambiente.

**Figura 5.4** Sistema propuesto de manejo de RSM



Cuando se separan los residuos, se logra un mejor aprovechamiento de los mismos; El material reciclable como el papel, cartón, vidrio y metal podría ser utilizado por particulares (tabla 4.2). En Querétaro existe mercado para dichos materiales, por lo que el Municipio podría delegar la función de su recolección a los particulares interesados.

Los materiales orgánicos estarían compuestos por todos los desperdicios de comida y residuos de jardinería, que serían recolectados por el Municipio y llevados a un sitio de composteo, cuyo producto podría servir para la recuperación de otros terrenos o para las tierras de cultivo.

Finalmente, todos aquellos materiales que no tengan posibilidad de ser aprovechados serían incinerados. Un incinerador de 130 ton/día posee un tamaño pequeño y las condiciones de operación serían relativamente más sencillas de controlar pese a la variedad de los residuos que llegan a él. También los costos de operación y mantenimiento disminuirían considerablemente respecto al que se manejaba al principio de este capítulo, porque el requerimiento de combustible se reduciría enormemente. Debido al tamaño del incinerador la producción de energía ya no sería considerable. En la tabla 5.7 se muestran los diferentes precios de operación y mantenimiento en diversos países de sitios de disposición.

Las cenizas, producto de la incineración, podrían ser aprovechadas como material de construcción pero esta acción iría en contra de la norma NOM-098-SEMARNAT-2004 por considerarlos residuos peligrosos, por lo que no se prescinde del relleno sanitario. Pese a esto existe una reducción más que considerable en el espacio requerido y por ende al daño al ambiente.

**Tabla 5.7 Costos unitarios de métodos de disposición**

Lugar	Costo Unitario (USD/Ton)	Año
Incineración		
Reino Unido	25	1998
No específico	36.01	1990
México	32	1999
México	31.9	1999
México	51.2	1999
México	52	1990
Minessota, EU	63.53	1991
Estados unidos	60	1998
México	125	2001
Viena	103	2001
Europa	57.4848	2001
<b>Costo promedio</b>	<b>58.00</b>	
Relleno sanitario		
América Latina y el Caribe	6	1998
Buenos Aires, Argentina	10	1996
Santiago de Chile	6	NE
Costa Rica, San José	2.9	NE
México, D.F.	4	NE
Río de Janeiro, Brasil	12	NE
Buenos Aires, Argentina	3.8	1994
Bogotá, Colombia	2.7	1994
Lima, Perú	2.5	1994
México	1.7054	1999
Japón	16.64	1993
Japón	13.34	1994
Minessota, EU	47.63	1991
Japón	16	1990
Japón	24	1992
Japón	8	1991
Montevideo, Uruguay	8	1994
Panamá	5	1994
Porto Alegre, Brasil	10	1994
Río de Janeiro, Brasil	40	1994
Sao Paulo, Brasil	8	1994
Europa	50.2992	2001
<b>Costo promedio</b>	<b>13.56</b>	

Fuente Camacho, 2003

## **CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones**

La contaminación ambiental por residuos sólidos es uno de los problemas más serios que aqueja, no sólo al Municipio de Querétaro, sino a todo el planeta.

Debido a la cantidad de residuos generados diariamente y al tiempo que tarda su degradación en rellenos sanitarios, es indispensable realizar acciones que disminuyan su generación y emplear sistemas que garanticen eliminar los residuos inmediatamente evitando su acumulación.

Con base en los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, se concluye que:

- El ambiente es invaluable, pero la asignación de un valor monetario es necesaria, en este trabajo, para utilizarlo como indicador de las pérdidas o ganancias en la calidad ambiental.
- Utilizar las matrices de impacto ambiental para evaluar el daño que provocan los sitios de disposición final estudiados resulta muy conveniente pues de esta forma se obtiene una medición integral, la cual considera todos los daños y beneficios al entorno.
- La estimación de externalidades, aunque no son una medición exacta, sirve para cuantificar el costo ambiental ocasionado por el relleno sanitario y el incinerador. Dicho costo se refleja en el deterioro de la salud de la población afectada y en la pérdida de la calidad del ambiente.
- El costo unitario por residuos incinerados (\$1,318.77) se tomó de bibliografía especializada (Yarto, 2006), misma que se corroboró con otras fuentes como Knauf Group (2008) y Camacho (2003).
- El relleno sanitario no debe seguirse ocupando como método único de disposición final, debido a las consecuencias ambientales negativas resultado de su operación. En el caso particular del Municipio de Querétaro, alargar la vida del relleno representa utilizar grandes extensiones de tierra; mismas que son requeridas para vivienda y la construcción de servicios.
- El incinerador es ambientalmente menos dañino que el relleno sanitario (ver figura 5.2), siendo sus principales ventajas el tiempo de eliminación de los residuos y el tamaño del terreno requerido para su instalación.
- Por la diferencia en los costos de operación y mantenimiento entre los métodos de disposición analizados (ver figura 5.3), la incineración posiblemente no se vaya a implantar en un futuro inmediato en el Municipio.

Finalmente, se debe recordar que los ingenieros industriales realizan importantes contribuciones gracias a su capacidad para analizar sistemas y establecer relaciones costo-beneficio entre sus elementos; acciones necesarias para la toma de

decisiones. De aquí que cada vez más estos ingenieros participen en los grupos interdisciplinarios que realizan estudios ambientales y contribuyan de manera directa en la evaluación de las aquí llamadas externalidades.

A partir de las conclusiones anteriores y las actividades propias del ingeniero industrial, se desprenden las recomendaciones siguientes:

- Partiendo de que las autoridades del Municipio de Querétaro no están en condiciones de implantar actualmente el incinerador, es indispensable que se inicie un programa de minimización, separación y reciclaje de residuos, ya que se calcula se podrían reducir la cantidad de residuos dispuestos en el relleno de 818 a 131 ton/día, lo que alargaría la vida útil del relleno sanitario.
- Debido a multidisciplinariedad de los estudios ambientales, la evaluación de las matrices de impacto se recomienda se realice con la participación de expertos de diferentes áreas del conocimiento.
- Es necesario realizar estudios periódicos del valor de externalidades para establecer un registro de cómo aumenta el costo ambiental a través del tiempo, a tal grado que el total (económico y ambiental) del incinerador sea inferior al costo total del relleno sanitario.

## **ANEXO. Criterios de evaluación ambiental**

La asignación de valores para la construcción de la matriz de evaluación de impacto, corresponde a las siguientes escalas:

- Valor de la propiedad
  - +3 Aumenta el valor comercial notablemente (más del 10%)
  - +2 Existe aumento considerable (5 a 10%)
  - +1 El incremento en el valor es poco significativo (1 a 5%)
  - 0 No existen cambios en el valor de la propiedad.
  - 1 Existe devaluación, pero no es considerable (1 a 5%)
  - 2 La propiedad sufre una devaluación perceptible (5 a 10%)
  - 3 La propiedad se devalúa considerablemente (más del 10%)
  
- Necesidades de espacio.- Debido a la naturaleza de este factor, no existen valores positivos.
  - 0 El espacio a utilizar no afecta al desarrollo de la comunidad
  - 1 El espacio a utilizar nunca fue considerado para otro fin
  - 2 Impide satisfacer necesidades a mediano y largo plazo (más de 3 años)
  - 3 Impide satisfacer necesidades inmediatas de espacio
  
- Cambio en el paisaje
  - +3 La instalación embellece notablemente el paisaje.
  - +2 La instalación puede considerarse como una mejora del paisaje
  - +1 Las instalaciones son agradables a la vista
  - 0 No se afecta el paisaje.
  - 1 La instalación es desagradable sólo para algunos vecinos
  - 2 La instalación es desagradable para todos los vecinos
  - 3 La instalación es desagradable y se observa desde grandes distancias
  
- Generación de ruido.- Este criterio es por definición negativo
  - 0 No se genera ruido
  - 1 El ruido se percibe sólo dentro de las instalaciones
  - 2 El ruido sale de la instalación pero es menor de 60 decibeles
  - 3 El ruido molesta a la población
  
- Generación de olor.- No existen efectos benéficos
  - 0 No genera olores.
  - 1 Los olores se perciben dentro de la instalación
  - 2 Se perciben olores ocasionalmente fuera de la instalación
  - 3 La población percibe constantemente olores desagradables
  
- Proliferación de fauna nociva.- No existen valores positivos
  - 0 No existe fauna nociva
  - 1 Es muy poco probable la generación de fauna nociva.
  - 2 Es un ambiente favorable para la proliferación, pero se tienen bajo control
  - 3 No existe control en la proliferación de fauna nociva

- Generación de empleos
  - +3 Aumenta significativamente el número de personas empleadas.
  - +2 Aumenta el número de empleados calificados
  - +1 Aumenta el número de empleados no calificados
  - 0 No genera nuevos empleos.
  - 1 Aumenta el número de personas desempleadas.
  - 2 Aumenta el número de personas desempleada de manera perceptible
  - 3 Aumenta significativamente el número de personas desempleadas
  
- Uso del suelo
  - 0 No requiere un sitio para su instalación
  - 1 El sitio de disposición requiere de menos de 20,000 m<sup>2</sup>
  - 2 El sitio de disposición requiere entre 20,000 y 100,000 m<sup>2</sup>
  - 3 El sitio de disposición requiere más de 100,000 m<sup>2</sup>
  
- Contaminación del suelo
  - 0 El suelo no se contamina, ni se afectan sus propiedades
  - 1 El suelo recupera naturalmente parte de sus propiedades originales
  - 2 Se requiere de un programa de recuperación
  - 3 El suelo nunca se recupera
  
- Emisiones de compuestos de azufre, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dioxinas, furanos y PST
  - 0 No existen emisiones
  - 1 Las emisiones se controlan
  - 2 Existen emisiones fugitivas no controladas
  - 3 No existe control de emisiones
  
- Contaminación de mantos freáticos
  - 0 No existe contaminación
  - 1 Existen equipos de control de lixiviados, pero pueden presentar fugas.
  - 2 No existe equipo de control, pero el coeficiente de permeabilidad del suelo es mayor a 10<sup>-9</sup> cm/s
  - 3 No existe equipo de control, el manto freático es somero o el coeficiente de permeabilidad menor a 10<sup>-9</sup> cm/s
  
- Tiempo de eliminación de los residuos
  - +3 La eliminación es prácticamente inmediata.
  - +2 La eliminación tarda de 1 a 10 años
  - +1 La eliminación tarda de 10 a 20 años
  - 0 Tiempo natural en que los residuos se degradan (mayor a 20 años).
  
- Generación o pérdida de algún bien
  - +3 Se generan bienes directamente aprovechables.
  - +2 Se requieren infraestructura para aprovechar bienes generados
  - +1 Se requieren infraestructura costosa para generar y aprovechar bienes

- 0 No se generan bienes
  - 1 Se pierden bienes por requerir infraestructura costosa
  - 2 Se pierden bienes que no requieren de infraestructura costosa
  - 3 Se pierden bienes que pueden ser aprovechados directamente
- Distancia entre generación y disposición
- 0 No se transportan residuos
  - 1 La disposición está aproximadamente en el centroide del área servida
  - 2 La distancia recorrida es aproximadamente de 10 km
  - 3 La distancia recorrida es mayor de 10 km
- Necesidades de mantenimiento
- 0 No requiere mantenimiento
  - 1 Mantenimiento sencillo y esporádico
  - 2 Mantenimiento sencillo rutinario
  - 3 Mantenimiento especializado constante

## MESOGRAFÍA

**Aguirre G.I., Vallejo A.S.A., Medina R.J.A., Jiménez Y.I., Tobón C.R., Rocha J.M. (comp.), 2001,** *Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos*, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

**ATSDR, 2001,** *Landfill Gas Primer - An Overview for Environmental Health Professional*, Department of Health and Human Services, U.S.

**Ayuntamiento de Querétaro, 2008,** Consulta por Internet al Sistema de solicitud de Información (SSI), Mayo 2008, <http://www.mqro.gob.mx/modules.php?name=Menu&archivo=informacionpublica>

**Azqueta D., 1994,** *Valoración económica de la calidad ambiental*, Mc Graw Hill, España.

**Banco de Inglaterra, 2008,** *Inflation report*, en internet: [www.bankofengland.co.uk/publications/inflationreport/irlatest.htm](http://www.bankofengland.co.uk/publications/inflationreport/irlatest.htm)

**BANCOMEXT, 2008,** *Proyectos sustentables y Mercado de Carbono*, Dirección de Finanzas Internacionales, Banco Nacional de Comercio Exterior.

**BM (Banco de México), 2008,** *Política monetaria e inflación*, en Internet: <http://www.banxico.org.mx/PortalesEspecializados/inflacion/inflacion.html>

**Camacho R.I., 2003,** *Análisis costo-beneficio de la incineración de residuos sólidos municipales en la Ciudad de México*, Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

**Canter L.W., 1996** *Environmental impact asesment*, Mc Graw Hill, International Editions

**CEPIS, 2005,** *Curso de orientación para el control de la contaminación del aire*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, traducido y adaptado al español de "Air pollution control orientation course", Lima, Perú en internet: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/cepis.html>

**Coordinación Estatal de Desarrollo Municipal, 2006,** *Enciclopedia de los Municipios de México. Querétaro*, Gobierno del Estado de Querétaro, en internet: [http://www.queretaro.gob.mx/EMM\\_queretaro/](http://www.queretaro.gob.mx/EMM_queretaro/)

**Corey R. (edit), 1990,** *Principles and practices of incineration*, Wiley-Interscience, Nueva York, U.S.

**De Paul F.T. y Crowder J.W., 1989**, *Control of emissions from municipal solid waste incinerator*, McGraw Hill, Illinois, U.S.

**EPA, 1995**, Compilation of Air Pollutant Emisión Factor, en Internet en <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s01.pdf>

**Go Currency, 2008**, Conversor de divisas, en Internet <http://www.gocurrency.com/conversor-de-monedas.htm>

**Henry J.G y Heinke G.W., 1999**, *Ingeniería Ambiental*, Pearson, México

**Kiss K. G. y Aguilar G, 2007**. *Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final*, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados, México.

**Knauf Group, 2008**, *Incineration Plant-Cost study*, en internet: <http://www.building.co.uk/story.asp?sectioncode=113&storycode=3285&c=1>

**Lotte S., 1998**, *Differences in Methodologies used for externality assessment*; Riso National Laboratory, Roskilde, Dinamarca.

**Medina R.J.A. y Jiménez Y.I. (comp.), 2001**, *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México

**Rosado J., y Tovar P., 1993**, Estudio de las externalidades en la generación de energía eléctrica, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica-Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México

**Rosiles C.G, 2008**, *Modelo Mexicano de Biogás*, Director de Infraestructura Urbana Básica, Secretaría de Desarrollo Social, México.

**Sapag N, Sapag R,1998**, Preparación y evaluación de proyectos, Mc Graw Hill, Tercera edición, Colombia

**SCS Engineers, 2005**, *Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Querétaro*, Querétaro, México.

**SEDESU, 2008**, *Manejo, Aprovechamiento y Disposición Final de Residuos*, Secretaría de Desarrollo Sustentable, Municipio de Querétaro, en internet: <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/medioam/manressolidos/aprobres.pdf>

**SEMARNAT, 2006**, Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, Diario Oficial de la Federación, Viernes 1 de octubre del

2006, México, en internet <http://www.economia.gob.mx/work/normas/noms/2004/098semarnat.pdf>

**SEMARNAT, 2007a**, *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*, Diario Oficial de la Federación, 12 de julio de 2007, México, en internet [http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/28011988\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/28011988(1).pdf)

**SEMARNAT, 2007b**, *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*, Diario Oficial de la Federación, 8 de junio de 2007, México, en internet <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/03/federal/01clave.pdf>

**SEMARNAT, 2008a**, *Normas Oficiales Mexicanas en materia de residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, en internet <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>

**Semarnat, 2008b**, *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, en internet

**Tchobanoglous G y Theisen H., 1996**, *Gestión integral de residuos sólidos*, McGraw Hill, México.

**Thesis Consulting, 2005**, *Estudio de factibilidad de la construcción y puesta en marcha de una estación de transferencia*, Departamento de Logística y Planeación de Servicios Municipales, Municipio de Querétaro.

**Turner Guy, Handley D, Newcombe J, Ozdemiroglu E, 2004**, *Valuation of the external costs and benefits to health and environment of waste management options*, Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, en internet [www.semarnat.gob.mx/LEYESYNORMAS/Pages/reglamentosdelsector.aspx](http://www.semarnat.gob.mx/LEYESYNORMAS/Pages/reglamentosdelsector.aspx)

**Yarto M., 2006**, *Aprovechamiento energético de los residuos*, Taller práctico sobre bioenergía, Monterrey, Nuevo León.