



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

VALORIZACION DE DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES  
CON ALTO PODER CALORIFICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R O Q U I M I C O**

P R E S E N T A :

**HERIBERTO ROSAS GOMEZ**



MEXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2005

0349855



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	PROFA. MARGARITA EUGENIA GUTIÉRREZ RUIZ
VOCAL	PROFA. MA. DEL PILAR CONSTANZA ORTEGA BERNAL
SECRETARIO	PROF. EUBERTO HUGO FLORES PUEBLA
1ER. SUPLENTE	PROF. ALFONSO DURÁN MORENO
2° SUPLENTE	PROFA. ROSA MARIA VILLEGAS ORTEGA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AMBIENTE, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

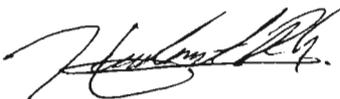
ASESOR DEL TEMA



---

M. EN C. MARGARITA EUGENIA GUTIÉRREZ RUIZ

SUSTENTANTE



---

HERIBERTO ROSAS GÓMEZ

**A Mamá**

**A Rosita<sup>†</sup>, Vilma, Alberto, Héctor y Alfonso**

**A Alejandra**

**A Papá**

**A Cajeta**

---

## AGRADECIMIENTOS

A mi Madre con todo el amor y admiración que siento hacia quien pese a su condición humilde y sin preparación académica brindó a sus hijos con cariño y esfuerzo las herramientas para que cada uno de nosotros forjara su presente. Gracias Mamá.

A mi hermana Vilma y hermanos Alberto, Héctor; quienes me dieron su apoyo para lograr culminar una de mis metas en la vida. A Alfonso, que aunque no sabemos nada de él, siempre deseamos se encuentre bien

A Ale por su amor, comprensión y motivación para seguir adelante, para seguir juntos adelante.

Agradezco a la M. en C. Margarita E. Gutiérrez por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo.

Al Instituto Estatal de Ecología de Oaxaca por el apoyo y facilidades otorgadas, en especial al Ing. José Luís Bustamante (Director del Instituto), a la M en D. Ruth Ivonne Aragón Escamilla (Directora de Protección Ambiental), a la Q.B. Blanca Zapata (Jefe del Departamento de Prevención y Control de la Contaminación), al QBP. Mauricio Calzadías, con quien trabajé en campo de forma excelente debido a su empeño y dedicación

Al Instituto Tecnológico de Oaxaca por las facilidades otorgadas en la instalación del equipo de trituración y pruebas en sus instalaciones. En especial al personal académico del laboratorio de Ingeniería Química de este Instituto.

Al Ing. Miguel Ángel Ramos (Consortio Minero Benito Juárez Peña Colorada), por su apoyo y facilidades otorgadas en el trabajo de campo.

---

A la Ing. Consuelo Reyes, Jefa del Laboratorio Central de Biología Ambiental del Gobierno del Distrito Federal por las facilidades otorgadas para la realización de los experimentos; un agradecimiento muy especial al Ing. Enrique Morales Meza, Jefe del Área de Físicoquímicos, por su apoyo y enseñanza en la realización de los experimentos.

Al Ing. José E. Santos Jallath y al Dr. Francisco Martín Romero.

Al personal del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

A todos quienes directa e indirectamente hicieron posible realizar este trabajo.

A los miembros del Jurado

---

---

---

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	I
LISTA DE CUADROS .....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE ABREVIATURAS .....	VII
RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES.....	7
1.1. <i>Definición del término desecho</i> .....	8
1.2. <i>Gestión tradicional de los desechos sólidos municipales (DSM)</i> .....	9
1.2.1. Relleno sanitario .....	10
1.2.2. Composteo .....	13
1.2.3. Incineración.....	15
1.3. <i>Manejo actual de los DSM en otros países y en México</i> .....	17
1.3.1. Estados Unidos de América .....	17
1.3.2. Países de Europa .....	20
1.3.3. Países de Asia .....	24
1.3.4. Argentina .....	26
1.3.5. Colombia .....	26
1.3.6. México.....	28
2. MARCO TEÓRICO.....	31

---

2.1. Una nueva visión para el manejo de los DSM.....	31
2.1.1. Modelo Económico-Termodinámico aplicado a los Sistemas Integrales de Valorización de DSM .....	31
2.1.2. Clasificación de los desechos con base en el enlace químico .....	33
2.1.3. Combustible derivado de desechos.....	36
2.1.4. Tecnologías “Desecho a Energía” .....	38
2.1.5. Poder Calorífico y su determinación experimental .....	39
2.1.6. Poder Calorífico de los DSM .....	45
2.2. Tecnologías térmicas para la valorización de desechos con APC .....	52
2.2.1. Gasificación .....	56
2.2.2. Pirólisis .....	60
2.2.3. Aplicación de la Gasificación y la Pirólisis.....	66
3. PARTE EXPERIMENTAL .....	91
3.1 Aspectos generales de los sitios donde se tomaron las muestras de DSM.....	92
3.1.1. “Sitio A”, ciudad y puerto del Océano Pacífico mexicano con actividad turística y comercial .....	92
3.1.2. “Sitio B”, ciudad del sureste con actividad turística.....	93
3.1.3. “Sitio C”, estación del Metro de la Ciudad de México.....	95
3.2. Toma de muestras y determinaciones “in situ” .....	97
3.2.1. Sitios A y B .....	99
3.2.2. Sitio C .....	110
3.3. Análisis de laboratorio.....	111

---

3.3.1. Determinación de poder calorífico .....	111
3.3.2. Determinación de humedad .....	120
4. RESULTADOS .....	121
4.1. <i>Determinación de poder calorífico de las muestras de DSM</i> .....	122
4.2. <i>Determinación de contenido de humedad</i> .....	128
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	129
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	134
BIBLIOGRAFÍA .....	135
APÉNDICE I. DETERMINACIÓN DE PODER CALORÍFICO .....	144
APÉNDICE II. SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO .....	166

## LISTA DE CUADROS

Cuadro A. Biodegradabilidad de diferentes materiales (US-EPA, 2003) .....	3
Cuadro 1.1. Comparación entre los procesos de compostaje aerobio y digestión anaerobia para el procesamiento de la fracción orgánica biodegradable de los DSM (Tchobanoglous, 1993).....	14
Cuadro 1.2. Reducción de la Fuente de DSM en los EEUA a partir de 1990. (US-EPA,2003).....	18
Cuadro 1.3. Manejo de desechos controlados (en porcentaje) en el Reino Unido en 1998 (DETR, 2000) .....	21
Cuadro 1.4. Países con altos índices de reciclado (Pellaumail, 2001) .....	22
Cuadro 1.5. Características de los DSM generados en algunas ciudades de Asia (Furedy, 1990).....	25
Cuadro 1.6. Composición de los DSM, generados e México en el periodo 1993-1998 (miles de toneladas) ....	28
Cuadro 1.7. Disposición de los DSM en México (1995-2000) (miles de toneladas) (INEGI, 2005).....	29
Cuadro 2.1. Propiedades típicas del CDD (European Commission, 2003).....	38
Cuadro 2.2. Poder calorífico de diferentes combustibles fósiles (Fuente: EIA, 2005).....	40
Cuadro 2.3. Poder calorífico típico de los principales componentes de los DSM (Tchobanoglous, 1993) .....	45
Cuadro 2.4. Evolución de las características de los desechos sólidos municipales mezclados para la CEE .....	46
Cuadro 2.5. Fracción de los plásticos en los DSM en diferentes países (Muñoz, 1980).....	47
Cuadro 2.6. Composición de los DSM en por ciento en peso en diferentes países (Beede and Bloom, 1995) ...	48
Cuadro 2.7. Composición de los DSM en México en los periodos 1974-1988 y 1991-1998 (Semarnat, 1999) ...	49
Cuadro 2.8. Composición de los DSM en México 1995 a 2004 (valores en por ciento en peso), (INEGI, 2005)...	50
Cuadro 2.9. Humedad y Poder calorífico de los DSM en estaciones de transferencia (GDF, 2002) .....	51
Cuadro 2.10 Humedad y Poder Calorífico de una muestra de DSM tomada en Bordo Poniente .....	51
Cuadro 2.11. Principales aspectos de los procesos de conversión térmica .....	54
Cuadro 2.12. Características da cada tipo de reactor utilizado en la pirólisis (Leidner, 1981).....	65
Cuadro 2.13 Principales tecnologías basadas en la pirólisis y la gasificación de DSM (Juniper, 2001).....	66
Cuadro 3.1. Proyección de generación total y per capita para el Sitio A - Manzanillo (INE, 1997) .....	93
Cuadro 3.2. Proyección de generación total y per capita para el Sitio B - Oaxaca de Juárez (INE, 1997) .....	94
Cuadro 3.3. Proyección de generación total y per capita para la Ciudad de México (INE, 1997) .....	96
Cuadro 3.4. Clasificación de los DSM, (Fuente: NMX-AA-015-1985).....	103
Cuadro 4.1. Análisis y pruebas realizados a cada muestra .....	121
Cuadro 4.2. Declaración de variables.....	122
Cuadro 4.3. Resultados obtenidos en la calibración del calorímetro.....	123
Cuadro 4.4 Estadística de los resultados obtenidos en la calibración del calorímetro .....	124
Cuadro 4.5. Resultados obtenidos en la determinación del PC de las muestras de DSM del Sitio A.....	124

Cuadro 4.6. Resultados obtenidos en la determinación del PC de las muestras de DSM del Sitio B .....	125
Cuadro 4.7. Resultados obtenidos en la determinación del PC de la muestra de DSM del Sitio C .....	125
Cuadro 4.8. Contenido de humedad (por ciento en peso) en las muestras del Sitio A .....	128
Cuadro 4.9. Contenido de humedad (por ciento en peso) en las muestras del Sitio B .....	128

## LISTA DE FIGURAS

Figura A. Proceso cíclico .....	1
Figura B. Generación de desechos en un proceso lineal (OECD, 1999) .....	2
Figura C. Triángulo de la problemática ambiental (Gutiérrez, 1999) .....	2
Figura 1.1 Derrumbe del relleno sanitario de la ciudad de Cali, Colombia. 13 de septiembre de 2001 .....	11
Figura 1.2. Número de rellenos sanitarios en los EEUU (1988-2001) .....	19
Figura 1.3. Manejo de DSM en los EEUU durante 2001 .....	20
Figura 1.4. Manejo de los DSM en el Reino Unido 1998/1999 (DETR, 2000) .....	21
Figura 1.5. Manejo de los DSM en Francia. (Tedjar, 1999) .....	23
Figura 1.6. Manejo de los DSM en Colombia (1999).....	27
Figura 1.7. Manejo de los DSM en México .....	29
Figura 2.1. Modelo Económico-Termodinámico (Guzmán M., 1999).....	32
Figura 2.2. Clasificación de los desechos con base en el enlace químico (Gutiérrez M., 1999) .....	35
Figura 2.3. Calorímetro a Presión Constante .....	43
Figura 2.4 Opciones para la generación de energía a partir de DSM (Kumar, 2000) .....	53
Figura 2.5. Gasificador de lecho fijo, corriente descendente (Fuente: Scottish Agricultural, 2002) .....	58
Figura 2.6. Gasificador de lecho fijo, corriente ascendente (Fuente: Scottish Agricultural, 2002) .....	58
Figura 2.7. Gasificador de lecho fluidizado (Fuente: Scottish Agricultural, 2002).....	60
Figura 2.8. Parámetros de operación que influyen en los productos del proceso de pirólisis .....	63
Figura 2.9. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Brightstar Environmental-SWERF® .....	68
Figura 2.10. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Compact Power .....	70
Figura 2.11. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Energos Technology .....	71
Figura 2.12. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Novera .....	73
Figura 2.13. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por FERCO Enterprises Inc. ....	75
Figura 2.14. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Foster Wheeler Ltd.....	77
Figura 2.15. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Graveson Energy Management .....	79
Figura 2.16. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por ENTECH Renewable Energy System .....	81

---

Figura 2.17. Diagrama del proceso desarrollado por ENTECH Renewable Energy System.....	81
Figura 2.18. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Mitsui Babcock Engineering Ltd. ....	84
Figura 2.19 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por WasteGen Ltd. ....	86
Figura 2.20 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Thermoselect .....	88
Figura 2.21 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por TPS Termiska Processer AB © 2003 .....	90
Figura 3.1. Diagrama de la metodología .....	91
Figura 3.2a. Trabajo en campo, Sitio A .....	99
Figura 3.2b. Trabajo en campo, Sitio B .....	100
Figura 3.3. Área elegida para el cuarteo de muestras de DSM.....	100
Figura 3.4. Depósito de los DSM en el área de cuarteo .....	101
Figura 3.5. Montón de desechos depositado .....	102
Figura 3.6. Paleo y homogenización.....	102
Figura 3.7. Selección y cuantificación de subproductos .....	104
Figura 3.8. Determinación del peso volumétrico de las muestras de DSM .....	106
Figura 3.9. Muestra para ser trasladada a laboratorio .....	107
Figura 3.10. Diagrama para la preparación de muestras para su traslado al laboratorio .....	108
Figura 3.11. Molino Mini Monster® 20000 y muestra triturada.....	109
Figura 3.12. Muestra triturada lista a ser llevada a laboratorio.....	110
Figura 3.13. Sección transversal de la Bomba Calorimétrica .....	111
Figura 3.14. Diagrama del procedimiento realizado en laboratorio .....	113
Figura 3.15. Bomba calorimétrica, unidad de ignición y soporte, Parr Instruments Modelo 1341 .....	114
Figura 3.16. Pasos para ligar los extremos del alambre a los electrodos (Urquiza, 1969).....	117
Figura 4.1. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio A.....	126
Figura 4.2. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio B .....	126
Figura 4.3. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio C .....	127

## LISTA DE ABREVIATURAS

APC: Alto poder calorífico

CDD: Combustible derivado de desechos

CIV: Centros integrales de valorización

DAE: Desecho a energía, tecnologías

DSM: Desecho sólido municipal

EPT: Elementos potencialmente tóxicos

NMX: Norma Mexicana

NOM: Norma Oficial Mexicana

PC: Poder calorífico

SIV: Sistemas Integrales de Valorización

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en exponer la valorización<sup>1</sup> de los desechos sólidos municipales (DSM) con base en su poder calorífico (PC) y para su uso como combustible<sup>2</sup> en procesos de recuperación de energía<sup>3</sup>, haciendo énfasis en el proceso de *pirólisis/gasificación*.

En el marco de la valorización de los DSM se realiza una investigación sobre los métodos de gestión actual de los DSM en México y otros países de América, Europa y Asia<sup>4</sup>, se presentan los fundamentos generales relacionados a la gestión tradicional<sup>5</sup> de éstos y a el manejo integral de los desechos como una opción mediante la cual se confiere nuevamente valor a los mismos de acuerdo a los *Sistemas Integrales de Valorización de Desechos*<sup>6</sup>, (Gutiérrez M. *et al.*, 1999).

Para conocer si es factible la recuperación de la energía contenida en los DSM es necesario que tengan ciertas características para ser catalogados como combustible derivado de desechos (CDD), la característica más importante es que posean un alto poder calorífico (APC), estén libres de materia orgánica biodegradable y su humedad no implique un consumo de energía adicional al proceso.

También se investiga sobre las tecnologías de tratamiento térmico avanzado DEFRA (2005) mediante las cuales se pueden valorizar los desechos con APC entre ellas: la incineración, la gasificación y la pirólisis; se presentan las ventajas y las desventajas de cada tecnología y se

---

<sup>1</sup> Valorización es el término que contempla métodos o procesos como el reciclado, el composteo, la incineración, la gasificación, la pirólisis con diferentes formas disponibles de recuperación de energía (combustible derivado de desechos, recuperación de metano, etc.) (Snigdha Ch., 2003).

<sup>2</sup> Combustible Derivado de Desechos (CDD) del inglés Refuse Derived Fuel (RDF).

<sup>3</sup> Waste-to-Energy (WTE) technologies, tecnologías desecho-a-energía, entre las cuales se encuentran la incineración, la gasificación y la pirólisis.

<sup>4</sup> En el caso del continente africano, no se obtuvo información sobre métodos de disposición alternativos a los tiraderos a cielo abierto o rellenos sanitarios (Zerbock, 2003).

<sup>5</sup> Disposición en relleno sanitario ó tiraderos a cielo abierto

<sup>6</sup> Sistema optimizado de las practicas de manejo de desechos, diseñado para proteger la salud humana y el medio ambiente, considerando los aspectos ambientales, energéticos, económicos sociales y políticos, que incluye uno o más de los componentes de la "jerarquía en el manejo de desechos", reducir, reusar, reciclar, recuperación de energía y disposición final.. (Fuente: International Energy Agency, Integrated Waste Management Group, 2004. <http://www.iea.org> )

incluyen algunas experiencias en otros países con respecto a la valorización de DSM con APC por medio de la gasificación y la pirólisis para la generación de energía. Complementariamente, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la determinación experimental del poder calorífico de los DSM, mediante la técnica de calorimetría, en muestras colectadas en tres diferentes sitios de México:

- Ciudad ubicada en la costa del Océano Pacífico con actividad turística y que consta de puerto de gran calado que se denomina “Sitio A”,
- Ciudad localizada con actividad turística del sureste denominada “Sitio B”, y
- Estación del Metro (Sistema de Transporte Colectivo-Metro) de la Ciudad de México, denominado “Sitio C”.

En los Sitios A y B, la toma de muestras se realizó directamente en el lugar de disposición final (depósito municipal); en el Sitio C la muestra se tomó de los desechos colectados en una estación del Metro (Capítulo 2).

Así mismo, se determinaron en estas mismas muestras otras propiedades físicas<sup>7</sup> para obtener una caracterización general de los DSM, como son su composición, peso volumétrico y contenido de humedad.

Con base en los resultados experimentales obtenidos y en la investigación documental sobre las tecnologías que aprovechan el APC de los DSM, se proponen las posibles opciones de valorización, de gestión y las tecnologías que pueden ser factibles de aplicar en nuestro país.

---

<sup>7</sup> En los sitios donde las condiciones de recursos humanos y de infraestructura lo permitieron.

## INTRODUCCIÓN

Los desechos, también llamados “*basura*”, no existen en la naturaleza, ya que los procesos son *cíclicos* y todo residuo se convierte en insumo de otro; son sistemas cerrados en materia pero abiertos en energía en los cuales los procesos metabólicos son muy eficientes y todo lo que desechan es utilizado en otros procesos abióticos o bióticos, por ejemplo, el proceso de la fotosíntesis transforma el dióxido de carbono y agua (productos de la respiración) en azúcar (energía química) mediante la energía solar y la clorofila de las plantas, la cual al reaccionar con oxígeno libera la energía que es consumida por los seres vivos para sus metabolismos, conformando un proceso cíclico (Gutiérrez M. *et al.*, 1999) (Figura A).

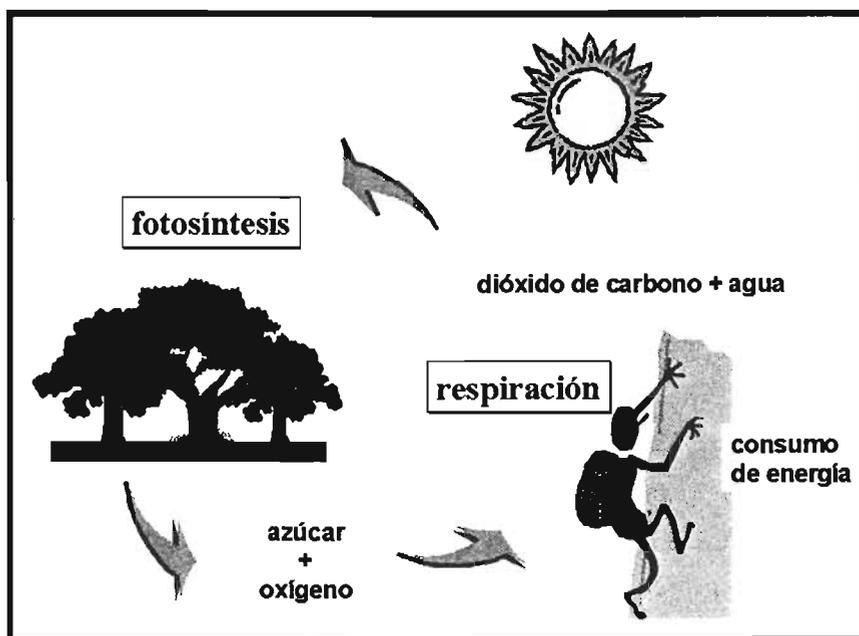


Figura A. Proceso cíclico

En cambio, el hombre para producir satisfactores conceptualizó procesos lineales, abiertos en materia y energía, los cuales generan desechos que se liberan al ambiente, contaminando la atmósfera, el agua y el suelo (Figura B).

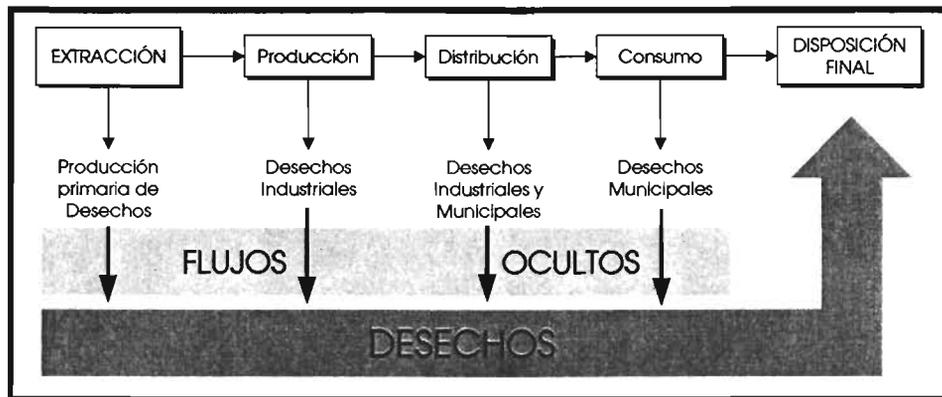


Figura B. Generación de desechos en un proceso lineal (OECD, 1999)

Mientras la cantidad de los desechos generados en los procesos lineales antropogénicos no fueron muy grandes, y por sus características químicas se podían descomponer en el ambiente debido a la acción de microorganismos (biodegradación), se integraron a los ciclos naturales y no se presentaron graves problemas. Sin embargo, cuando el desarrollo tecnológico y económico de los países favoreció un crecimiento importante de la población y su concentración en las ciudades, los patrones de consumo y la generación de los desechos de los hogares e industria también aumentaron (Gutiérrez M. *et al.*, 1999) (Figura C).

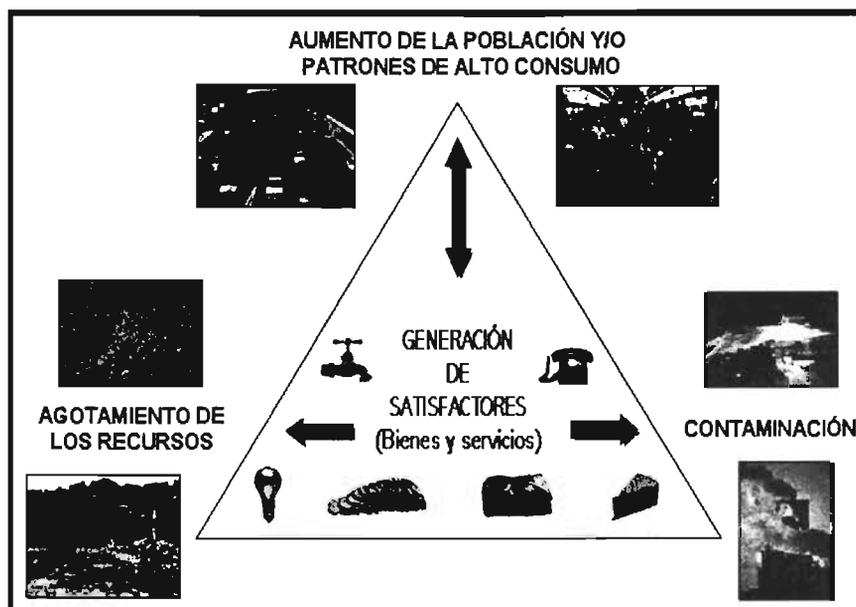


Figura C. Triángulo de la problemática ambiental (Gutiérrez, 1999)

Esto ha provocado el agotamiento de recursos y la contaminación del medio ambiente. A partir de la industrialización masiva de amplias regiones del mundo las características de los desechos sólidos (DS) cambiaron, por una parte aumentó la cantidad de materiales biodegradables pero por otra también la de aquellos desechos conformados por compuestos que ya no podían reintegrarse a los ciclos naturales<sup>8</sup> (Cuadro A). En consecuencia, la naturaleza ya no pudo amortiguar o asimilar sus efectos y se produjeron accidentes, especialmente cuando se mezclaban desechos que contenían sustancias tóxicas o reactivas de uso general, como los plaguicidas, los disolventes y los *elementos potencialmente tóxicos* (EPT), conocidos como “metales pesados”. Las regiones más susceptibles a presentar este tipo de riesgos fueron las de mayor densidad poblacional o industrial, o en donde se permitió la urbanización en terrenos que habían sido sitios de disposición de DSM y en algunos casos, de desechos industriales (Gutiérrez M. *et al.*, 1999).

**Cuadro A. Biodegradabilidad de diferentes materiales (US-EPA, 2003)**

Material	Tiempo de biodegradabilidad (años)
Cáscara de plátano/naranja	2 – 5 semanas
Cuero	1
Periódico	Hasta 50
Lata de aluminio	80 – 100
Botella de plástico	100 – 200
Botella de vidrio	1'000,000

En las ciudades industrializadas, la basura se acumulaba en cualquier sitio disponible de las ciudades o se arrojaba a barrancas o cuerpos de agua, favoreciendo la proliferación de enfermedades, muchas de ellas de carácter epidémico. Para controlarlas se implantaron soluciones sanitarias rápidas como la quema a cielo abierto o el enterramiento de los desechos, prácticas que todavía se siguen aplicando y que favorecen el *calentamiento global* (US-EPA, 2003).

<sup>8</sup> Entre ellos, los derivados de los hidrocarburos, como los plásticos, que forman parte de los *productos desechables y no biodegradables*.

Con el tiempo estos métodos se mejoraron, especialmente en los países económicamente más desarrollados se implementaron rellenos sanitarios e incineradores, que son procesos con mayor control para la protección del medio ambiente, pero que presentan diversos retos ambientales, técnicos y económicos. Lee G. *et al.*, (2003), señalan algunos problemas asociados a los rellenos sanitarios, como la carencia de sitios adecuados para su instalación, crecientes costos de operación y mantenimiento, emisiones de gases que incrementan el efecto invernadero, producción de lixiviados<sup>9</sup> e incumplimiento de la normatividad ambiental vigente en varios países. Además de que a futuro conforman un pasivo ambiental<sup>10</sup>.

La instalación de incineradores demanda altos costos, ya que se requiere de una gran cantidad de energía para obtener una correcta combustión de los desechos, así como equipos de control para asegurar que las emisiones a la atmósfera cumplan con la legislación ambiental, por otra parte, las cenizas residuales se deben enviar a confinamientos controlados (McKone T. H. y Hammond S. K., 2000).

Actualmente, los DSM desde un punto de vista energético y comercial se pueden gestionar de la siguiente forma: los desechos que tienen valor económico se pueden reciclar o comercializar directamente para su reuso, por ejemplo para utilizarse como materia prima en otros procesos. En cambio, los desechos que no tienen algún valor económico y tampoco pueden ser sujetos de reciclado se pueden analizar para conocer su PC y, en caso de tener un alto poder calorífico (APC), valorizarlos para ser utilizados como energéticos en diferentes aplicaciones, entre ellas, la generación de energía eléctrica<sup>11</sup> (Reynolds *et al.*, 2002).

Las posibilidades de reuso o reciclaje de los desechos son múltiples, pero la mayoría no son posibles de operar por obstáculos de carácter técnico difíciles de superar bajo las condiciones socio-económicas de la mayoría de los países. Especialmente resulta difícil

---

<sup>9</sup> Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción arrastre o percolación y que contiene disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos. (NOM-083-ECOL-1996).

<sup>10</sup> Es el conjunto de los daños ambientales, en términos de contaminación del agua, del suelo, del aire, del deterioro de los recursos y de los ecosistemas, producidos por una empresa, durante su funcionamiento ordinario o por accidentes imprevistos, a lo largo de su historia.

<sup>11</sup> Estos desechos por sus características se denominan combustible derivado de desechos, CDD (del inglés, Refuse Derived Fuel, RFD).

valorizar los desechos municipales en países donde están mezclados con desechos de servicios e inclusive con residuos industriales; como es el caso de México; donde solamente son separados para su reciclaje aquellos materiales que representan un valor comercial en el mercado, como es el vidrio, el cartón, el papel, el trapo, el aluminio, etc.

En México, los municipios se ven enfrentados a resolver un grave problema de contaminación derivada de la gestión de los DS sin recursos económicos y humanos. Los pocos ensayos de solución han fracasado, básicamente por haber instrumentado soluciones sin considerar las condiciones locales, regionales y nacionales (Gutiérrez M. *et al.*, 1999).

Las nuevas alternativas para el manejo de los DSM son el establecimiento de Sistemas Integrales de Valorización (SIV) de Desechos Sólidos Municipales, que incluya la reducción en la fuente, y el máximo aprovechamiento y valorización de los desechos (US-EPA, 2003).

Una opción para manejar estos DSM mezclados, específicamente los que tienen un APC y no son biodegradables (combustible derivado de desechos), es mediante la recuperación de energía, a través de diferentes procesos como son la incineración, la pirólisis y la gasificación, principalmente. Estas tecnologías se denominan “Desecho A Energía” (DAE), WTE por sus siglas en inglés waste to energy.

De esta forma, los objetivos de este trabajo son la investigación sobre los métodos tradicionales de gestión y el manejo actual de los DSM en diferentes países y regiones del mundo, incluyendo nuestro país; la investigación sobre las tecnologías “Desecho a Energía” que aprovechan el poder calorífico de los DSM - CDD y establecen procesos más eficientes y limpios para generar energía aprovechable a partir de desechos sólidos; así mismo, generar información del poder calorífico del CDD<sup>12</sup> y la vinculación de estos datos para integrarlos al entorno tecnológico que actualmente está en etapas de investigación, pruebas

---

<sup>12</sup> Es importante señalar que este tipo de datos es aún difícil de generar en México, debido a la falta de recursos económicos y humanos suficientes para ello, los datos que hay corresponden principalmente a la Ciudad de México y a muestras que no contemplan la opción de aprovechar solamente el CDD y que incluyen la materia orgánica biodegradable con altos contenidos de humedad, la cual se puede utilizar en la elaboración de composta.

piloto y desarrollo comercial en países de Europa, de Asia y de los EEUA con el fin de desalentar el uso de rellenos sanitarios y la incineración y emplear nuevas tecnologías aplicadas en este campo<sup>13</sup>, en el marco de los sistemas integrales de valorización de desechos y que pueden ser viables en aspectos técnicos y económicos para valorizar los DSM.

Como se menciona, se hace énfasis en las tecnologías basadas en la gasificación y la pirólisis como opciones aplicables con base en el poder calorífico de la materia prima, en este caso del combustible derivado de desechos. Asimismo, en esta tesis se presentan diferentes patentes y procesos en etapas de prueba piloto o a nivel comercial, que forman parte de los SIV.

---

<sup>13</sup> La gasificación y la pirólisis de materiales sólidos no es un nuevo concepto, ya que se han utilizado extensivamente para producir combustibles tales como carbón de leña, coque o gas combustible. El carbón de leña y el coque son producidos por la pirólisis de la madera y el carbón respectivamente y el gas combustible es producido mediante la gasificación del coque en presencia de aire y de vapor. (DEFRA, 2005).

## 1. ANTECEDENTES

Actualmente existen *sistemas integrales* para el manejo y *valorización* de los DSM (US-EPA, 2003), que pueden ser utilizados donde no conviene construir rellenos sanitarios tradicionales. Un sistema basado en las características químicas de los desechos (Gutiérrez M *et al.*, 1999), y en las tecnologías “desecho a energía”, permite recuperar los valores de los desechos ya sean domésticos o industriales, siendo su principal fuente de ingresos la venta de subproductos y de energía generada a partir del tratamiento de los desechos, a diferencia de los sistemas tradicionales que únicamente reciben ingresos por cuotas, como en el caso de los rellenos sanitarios.

Los sitios donde se llevan a cabo estos sistemas para el manejo de los DSM, se denominan Centros Integrales de Valorización (CIV), los cuales utilizan criterios científicos y técnicos para cuidar el ambiente, tomando en cuenta los aspectos geográficos y socioeconómicos más importantes de su entorno. Es decir, cada sistema integral se planea como un caso específico ya que se toma en cuenta la cantidad y calidad de los desechos, las formas tradicionales de manejo, la organización para el acopio, el mercado potencial para los subproductos y los recursos con que se cuenta (físicos, humanos y económicos). (*Idem*).

Entre las tecnologías disponibles y que pueden ser aplicables en los CIV, están los procesos térmicos como son la incineración, la pirólisis y la gasificación, que permiten el manejo de materiales desechados derivados de petróleo (plásticos, hules, gomas, etc.), que son sumamente abundantes, cuyo volumen se incrementa con el tiempo<sup>14</sup> y presentan un APC (Tchobanoglous, 1993).

---

<sup>14</sup> De acuerdo a las tendencias a largo plazo en la composición de los DSM, se espera un aumento en la generación de este tipo de materiales y la disminución en el uso del vidrio (US-EPA, 2003).

De esta forma las tecnologías ambientales buscan imitar a la naturaleza y utilizar a la basura como materia prima para generar energía u otros satisfactores, minimizando el gasto de combustibles y agua, y la generación de contaminantes. Además, es necesario que los procesos sean rentables, por lo que hay una tendencia a seleccionar procesos térmicos reductores (pirólisis y parcialmente, la gasificación) y descartar los procesos térmicos de oxidación (incineración) por su impacto sobre el ambiente (UNEP, 2003).

Asimismo es necesaria la adecuación de la mejor tecnología para el aprovechamiento de los DS con APC, contemplando los aspectos económicos de la región, ya que por ejemplo la incineración demanda grandes cantidades de recursos económicos tanto para su operación como para el control de emisiones contaminantes al ambiente.

### 1.1. Definición del término desecho

El término desecho proviene del latín *disiectāre* y se refiere a lo que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de una cosa || 2. Cosa que, usada o por cualquier otra razón, no sirve a la persona para quien se hizo || 3. Residuo, basura. A su vez, *residuo* deriva del latín *residuum* y se refiere a la parte o porción que queda de un todo. || 2. Lo que queda de la descomposición o destrucción de una cosa. || 3. Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación, (DLE, 1992).

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 1998), señala que un *residuo* es cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

De acuerdo a Gutiérrez M. (1999) esta definición no es completa pues no se refiere en forma específica a la posibilidad de reutilizarlo nuevamente, ni explica que también se generan en los hogares y en diversos servicios. Una definición más completa puede ser la siguiente:

---

*"Los desechos son materiales u objetos que el generador o poseedor descarta por limitaciones ya sean técnicas, económicas, culturales, legales, o de cualquier otra índole, pero que pueden adquirir valor nuevamente cuando las condiciones que los originaron, cambian"* (Gutiérrez M et al., 1999).

Asimismo, la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal establece como residuo sólido al material, producto o subproducto que sin ser considerado como peligroso, se descarte o deseche y que sea susceptible de ser aprovechado o requiera sujetarse a métodos de tratamiento o disposición final (GDF, 2003)

Por lo tanto, se debe procurar aplicar tecnologías que permitan la mayor y mejor valorización de los desechos y transformar aquellas sustancias peligrosas que contienen los desechos que no pueden ser comercializados a especies termodinámicamente similares a las que existen en la naturaleza, de manera que puedan disponerse con toda seguridad.

## *1.2. Gestión tradicional de los desechos sólidos municipales (DSM)*

Tradicionalmente los desechos se clasifican de acuerdo al tipo de generador y/o sistema de recolección, y aunque hay diferentes sistemas de clasificación, en general los desechos se dividen en: *domiciliarios; institucionales; áreas y vías públicas; comercial y de servicios, y de construcción y demolición* (SEMARNAT, 1999, pág. 92). Los primeros, son todos aquellos colectados por el servicio de limpia a cargo de las autoridades municipales o empresas particulares que tienen la concesión del servicio, y contienen los desechos domésticos (casas, conjuntos habitacionales, etc.); los de servicios (transporte, restaurantes, escuelas, oficinas, hoteles, comercios, etc.), y los generados en áreas públicas (calles, jardines, plazas, etc.). En los países más avanzados, debido al control en la recolección, los desechos municipales están libres de basura industrial, y generalmente son enviados a rellenos sanitarios donde se disponen, con excepción de algunos desechos especiales que reciben un tratamiento preliminar y son enviados a confinamientos controlados (OECD, 1999).

En general la instalación de rellenos sanitarios, confinamientos e incineradores desalienta la reducción, minimización y valoración de los desechos pues hacen incosteable la aplicación de tecnologías amables para el ambiente (MacDonald, J.A. 1997).

En países donde no hay suficiente espacio o los sitios disponibles para ubicar rellenos y confinamientos no cumplen con las especificaciones mínimas para proteger al medio ambiente, se ha recurrido al tratamiento de los desechos mediante la *incineración* (oxidación a altas temperaturas). Durante la incineración los desechos se convierten a especies gaseosas y cenizas, y el calor generado se utiliza en algunos casos para producir vapor y generar electricidad. A pesar de la gran aceptación que goza esta tecnología dentro del sector industrial, requiere de un estricto control de su operación y de sus emisiones a la atmósfera<sup>15</sup>. Los costos de operación dependen de la cantidad y calidad de los desechos (básicamente de su PC y de su contenido de humedad), su mantenimiento está en función de la generación de desechos, por lo que cuando hay cambios en las tecnologías industriales, en el número de usuarios o si la oferta de desechos se reduce, puede llegar a ser un proceso no rentable.

La principal causa de rechazo de las comunidades a esta tecnología se debe al riesgo potencial de contaminación de la atmósfera, ya que inclusive los sistemas más complejos forman sustancias refractarias tóxicas en cantidades vestigiales que se bioacumulan como las dioxinas, furanos y mercurio, (US-EPA, 1997).

### 1.2.1. Relleno sanitario

También conocido como depósito o vertedero controlado, fue el primer tipo de tecnología que se utilizó para sustituir los tiraderos a cielo abierto, y todavía está en uso, ya que es un proceso de manejo de materiales cuya administración es generalmente proporcionada por las autoridades municipales a través de cuotas de los generadores. La recuperación de la

---

<sup>15</sup> Principalmente compuestos organoclorados (OC's) y (poli cloro bifenilos (PCB's) policlora dibenzodioxinas y policlora dibenzofuranos, cadmio, plomo, mercurio, dióxido de azufre. Fuente: Summaries of Related Solid Waste Incineration Rules. Office of Air & Radiation, (US-EPA, 1997). Documento en línea <http://www.epa.gov/oar/oaqps/takingtoxics/p3.html> .(2004)

inversión es muy rápida y su desarrollo requiere de lapsos relativamente cortos. No obstante presenta las siguientes limitaciones:

- *Ubicación:* a pesar que la selección del sitio es vital para el éxito, en la mayoría de los casos no se selecciona una zona adecuada geográficamente sino que por razones económicas se ubica en el tiradero en uso, en sitios no muy lejanos a las poblaciones con el propósito de abatir costos de transporte; por lo que tarde o temprano se presentan problemas de lixiviación de contaminantes al subsuelo (Lee G. *et al.*, 2003).
- *Control del biogás:* debe contar con pozos de captación de biogás y utilizarlo en cogeneración o quemarlo para que no contamine la atmósfera, ya que es un gas tóxico y de olor desagradable,
- *Mantenimiento del vertedero:* el control del proceso es crítico para asegurar un porcentaje aceptable de humificación (transformación del material biodegradable en fracción orgánica del suelo). Además pueden presentarse problemas de estabilidad física (Figura 1.1),
- *Fondos gubernamentales:* debido a que el proceso no es rentable, el costo de inversión y mantenimiento es muy alto y gravita sobre los presupuestos de los gobiernos municipales.



Figura 1.1 Derrumbe del relleno sanitario de la ciudad de Cali, Colombia. 13 de septiembre de 2001.

En México por ejemplo, el Sitio B no reúne las condiciones para ser utilizado como relleno sanitario permanente, tal y como se requiere por la legislación correspondiente, Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-1996<sup>16</sup>, ya que no cumplen con las siguientes disposiciones oficiales:

- Debe estar alejado a una distancia mínima de 1,500m (mil quinientos metros), a partir del límite de la zona urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.
- La distancia de ubicación del sitio con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1000m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.
- Debe estar a una distancia mínima de 60m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamiento en un periodo de tiempo de un millón de años.
- Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir, que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.
- Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.
- La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100m (cien metros) de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar.

---

<sup>16</sup> Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1996.

### 1.2.2. Composteo

El composteo es el proceso natural de descomposición y reciclaje de la materia orgánica biodegradable para convertirla en tierra rica en humus (Risse y Faucette, 2000). Con la excepción de los subproductos plásticos, de hule o goma y de cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los DSM se puede considerar compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, carbohidratos, celulosa, lignina y ceniza. A través del composteo, los nutrientes disponibles y las fuentes de energía son convertidos en dióxido de carbono, agua y una compleja forma de materia orgánica, conocida como composta (Tchobanoglous, 1993).

Los objetivos principales y *ventajas* del composteo de los DSM son:

- Reducir el volumen original de los desechos, transformándolos en materiales orgánicos biodegradables estables.
- Eliminar los microorganismos patógenos y parásitos comunes que pueden estar presentes
- Retener el máximo contenido nutrimental (nitrógeno, fósforo y potasio)
- Elaborar un producto que se pueda utilizar como fertilizante natural del suelo

Existen dos tipos de composteo: *aerobio* y *anaerobio*. Ambos procesos se aplican en la gestión de los desechos sólidos y cada uno ofrece diferentes ventajas.

El funcionamiento general de los procesos anaerobios es más complejo que el de los procesos aerobios. Sin embargo, los procesos anaerobios ofrecen el beneficio de la recuperación de energía en forma de gas metano, por lo que son productores netos de energía (Finstein *et al.*, 1986). Por el contrario, los procesos aerobios son consumidores netos de energía debido a que necesitan oxígeno para la conversión de los desechos no obstante, tienen como ventaja un funcionamiento relativamente sencillo y bajo operaciones

óptimas pueden reducir significativamente el volumen de la porción orgánica biodegradable de los DSM. En el Cuadro 1.1 se resumen las ventajas relativas de los procesos de composteo aerobios y anaerobios

**Cuadro 1.1. Comparación entre los procesos de compostaje aerobio y digestión anaerobia para el procesamiento de la fracción orgánica biodegradable de los DSM (Tchobanoglous, 1993)**

Característica	Procesos aerobios	Procesos anaerobios
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos finales	Humus, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Lodos (fangos), CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Reducción de volumen	Hasta el 50 %	Hasta el 50 %
Tiempo de procesamiento	20 a 30 días	20 a 40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de composta	Reducción de volumen, estabilización de residuos

Las *desventajas* del composteo son, principalmente:

- Clasificación previa. Se requiere de una separación de la basura orgánica de la inorgánica. Es esencial que se tenga un estricto control de los residuos peligrosos, pues su presencia afecta negativamente el proceso de composteo. Además, el plástico disminuye la calidad de la composta y, sobre todo, su aceptación.
- Fertilizante pobre. El valor nutricional de la composta es baja y, a pesar de que es un excelente mejorador de la textura de los suelos, no es aceptado por jardineros y campesinos cuando observan que no da los resultados de los fertilizantes comerciales (aprox. 1.5% de N).
- Condiciones estrictas de composteo. El control del proceso es vital, pues en caso de no alcanzarse la temperatura óptima, los microorganismos pueden sobrevivir y causar enfermedades a usuarios y vecinos. La descomposición microbiana es un proceso

complejo de controlar, que depende de la composición de los desechos y también de la temperatura.

- Relleno sanitario complementario. Hay que contar con un vertedero adicional, pues el porcentaje de rechazos puede ser muy alto, dependiendo del tipo de basura (12% de la fracción orgánica y 47.3% de la inorgánica en el vertedero de Madrid).
- Requiere de apoyo parcial económico. Debido al costo de transporte y del proceso en la mayoría de los casos no es totalmente rentable y requiere de fondos municipales.

### 1.2.3. Incineración

La incineración se define como el procesamiento térmico de los desechos sólidos mediante oxidación química con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno. Los productos finales incluyen gases calientes de combustión, compuestos principalmente de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea), y rechazos no combustibles (ceniza). Se puede recuperar energía mediante el intercambio de calor procedente de los gases calientes de combustión (Tchobanoglous, 1993).

Las principales *desventajas* de los procesos de incineración radican en los costos de operación y mantenimiento, los cuales en países como México, representan que no sea viable su instalación:

- Equipo para el control de emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, partículas sólidas, HCl y orgánicos policlorados (Policloro dibenzo dioxinas (PDD) y Policloro dibenzo furanos (PPF)). Cuando la temperatura disminuye se emiten a la atmósfera, metales y compuestos orgánicos<sup>17</sup>.
- Confinamiento. No hay información sobre, pero los fabricantes recomiendan manejarlas como peligrosas y confinarlas.

<sup>17</sup> De acuerdo a un estudio publicado en el *Journal of Epidemiology and Community Health*, de nacimientos que tuvieron lugar entre 1956 y 1993 en Cumbria al noroeste de Inglaterra, reportó que el riesgo de padecer defectos en el tubo neural, especialmente espina bífida (médula espinal), era de un 17% superior, y los defectos cardíacos eran un 12% más elevados entre los hijos de madres que vivían cerca de incineradoras. El riesgo de nacimiento de niños muertos era un 4% superior y el riesgo de una malformación cerebral mortal, la anencefalia, era un 5% superior entre los niños cuyas madres residían cerca de los crematorios de la localidad. (Diario El País, 2003).

- Apoyo parcial económico. La rentabilidad económica es muy relativa, inclusive si se utiliza la incineración para cogeneración, pues se gasta una gran cantidad de energía para calentar a un mínimo de 1000°C durante un tiempo determinado; y únicamente se utiliza el calor residual de los gases para producir vapor y posteriormente electricidad.

### *Ventajas*

- No se requiere de una preparación y/o separación previa de los desechos, debido a los controles de emisiones a la atmósfera que deben instalarse.
- Hay una reducción del volumen de los desecho entre un 85 y 95%. Lo cual reduce el espacio físico para la disposición final de los desechos
- Se puede recuperar energía para generar vapor o electricidad, como se mencionó, mediante el uso de intercambiadores de calor, calderas, turbinas, etc.

### 1.3. Manejo actual de los DSM en otros países y en México

#### 1.3.1. Estados Unidos de América

La US-EPA (Agencia de Protección al Ambiente de los EEUA) ha integrado una jerarquía para el manejo de desechos sólidos municipales, la cual tiene los siguientes componentes en orden de preferencia (US-EPA, 2003):

- Reducción en la fuente (o prevención de desechos), que incluye el reuso de productos y el composteo de desechos de jardinería en el mismo sitio donde se generaron.
- Reciclado, incluyendo composteo
- Disposición, incluyendo la combustión de desechos (preferentemente con la recuperación de energía) y el uso de rellenos sanitarios.

No obstante que la US-EPA hace un énfasis en el primer componente de la jerarquía, en conjunto, los tres componentes son de suma importancia para el manejo de DSM.

#### *Reducción en la fuente*

También se denomina prevención de desechos, que contempla el diseño, la manufactura, la compra o el uso de materiales, como empaques, para reducir su cantidad o toxicidad antes de disponerse mediante un sistema de manejo de DSM. Algunos ejemplos de las actividades de reducción son:

- Diseño de productos o empaques para reducir la cantidad o toxicidad de los materiales utilizados en su manufactura o para hacerlos de fácil reuso
- Reuso de productos o empaques, por ejemplo, envases reutilizables, reuso de brochas, re-acondicionamiento de tambores y barriles
- Alargamiento de la vida útil de productos, tales como las llantas
- Uso de empaques para reducir el daño físico o averías a productos

- Manejo de desechos orgánicos biodegradables (por ejemplo, restos de comida o desechos de jardinería), mediante composteo u otras alternativas de disposición (por ejemplo, dejar los cortes de pasto cerca de donde se hizo su poda.

En 2000, los instrumentos empleados para el manejo de DSM en los EEUU evitaron que más de 55 millones de toneladas de DSM fueran dispuestas. En el Cuadro 1.2 se presenta el crecimiento que ha tenido la "reducción de la fuente".

**Cuadro 1.2. Reducción de la Fuente de DSM en los EEUU a partir de 1990. (US-EPA,2003)**

Año	Millones de toneladas de DSM
1992	0.6
1994	8.0
1995	21.4
1996	31.0
1997	31.8
1998	37.3
1999	42.8
2000	55.1

Nota: La reducción de la fuente estimada para 2001 se proyectó similar a la del año 2000

### *Reciclado*

- Mediante el reciclado (incluido el composteo) se recuperó el 30% de DSM en 2001.
- Durante 2001, se establecieron aproximadamente 9,700 programas de reciclado en todo el país, teniendo un crecimiento del 5% con respecto al año anterior (9,250).
- En 2001 se reportaron 3,800 programas de composteo.

### *Disposición*

En 2001, el 14.7 % de los DSM generados se trató por combustión, siendo ligeramente mayor al 14.5 %, presentado en 2000. Durante 2001, aproximadamente el 55.7 % de los

DSM se dispusieron en rellenos sanitarios. Como se muestra en la Figura 1.2, el número de rellenos sanitarios en los EEUA, ha decrecido sustancialmente, en 1988 había cerca de 8000 rellenos sanitarios, en 2001 se reportaron solamente 1858 –correspondiendo en parte a un aumento en la capacidad de recepción de los rellenos–. Debido a su extensión territorial, los EEUA no presentan problemas de espacio para la instalación de rellenos sanitarios.

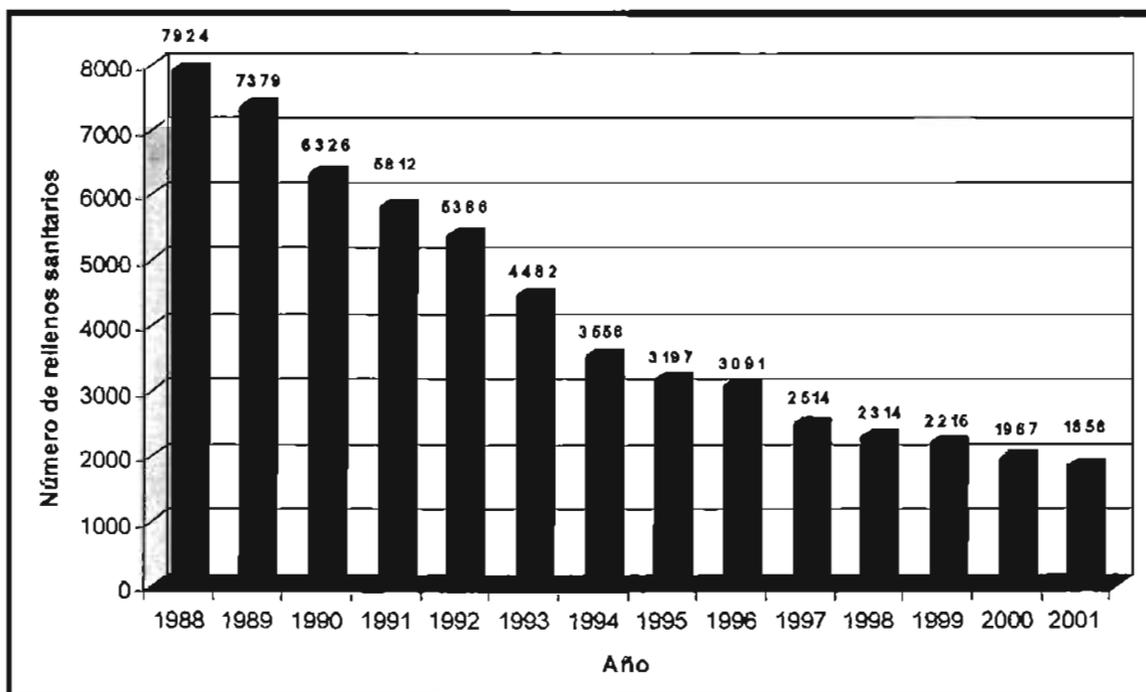


Figura 1.2. Número de rellenos sanitarios en los EEUA (1988-2001)

- El porcentaje de los DSM dispuestos en rellenos sanitarios decreció muy poco de 2000 a 2001. La cantidad de DSM llevados a rellenos sanitarios en 1990 fue de 140.1 millones de toneladas, reduciéndose a 122.4 millones de toneladas en 1995. Sin embargo en 1999, se reportó un aumento a 131.8 millones de toneladas, decreciendo nuevamente hacia 2001, con 127,6 millones de toneladas. Cabe señalar que las cantidades reportadas son reflejo de la interacción de diferentes variables, tales como la generación, el reciclado, la combustión de desechos y que no necesariamente se presentan simultáneamente.

- La generación *per cápita* (después del reciclado y composteo) fue de 1,406 kg por persona por día, siendo menor a la reportada en 2000, que fue de 1,451 kg/persona/día

El porcentaje de los DSM recuperados para reciclado (incluyendo composteo) y los dispuestos mediante relleno sanitario o combustión en los EEUA se presentan en la Figura 1.3. En 2001, el 29.67 % (68.0 millones de toneladas) de los DSM se reciclaron; el 14.66 % (33.6 millones de toneladas) se trataron por combustión, y el 55.67 % (127.6 millones de toneladas) se dispusieron en rellenos sanitarios o por otros métodos.

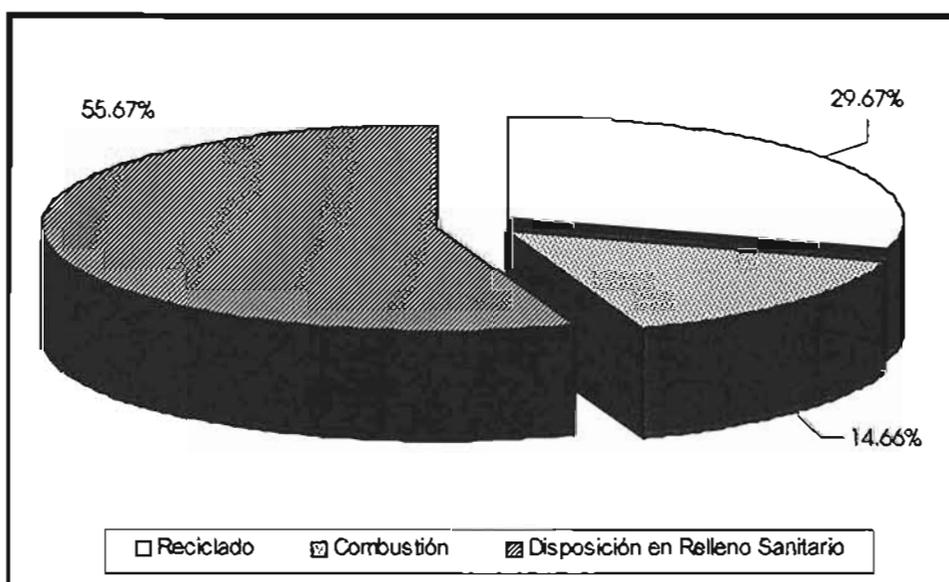


Figura 1.3. Manejo de DSM en los EEUA durante 2001

### 1.3.2. Países de Europa

#### Reino Unido

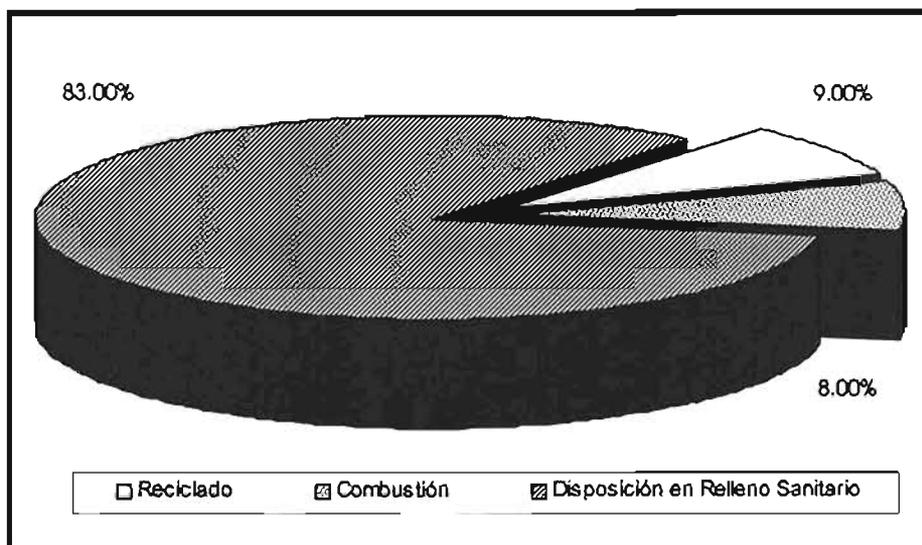
En Inglaterra y Gales, se producen alrededor de 400 millones de toneladas de desechos, de los cuales, 28 millones corresponden a DSM (DETR, 2000). El Reino Unido ha tenido un manejo histórico de los DSM, mediante rellenos sanitarios y de incineración.

El 58% de los desechos que llevan un control (desechos de casas, comercios, industrias, construcción y demolición) se disponen en rellenos, mientras que el 26% son reciclados o utilizados para la elaboración de composta (Cuadro 1.3). La cifra son bajas si se comparan con países como Holanda, en los cuáles el 82% de los desechos se reciclan o se usan para composta.

**Cuadro 1.3. Manejo de desechos controlados (en porcentaje) en el Reino Unido en 1998 (DETR, 2000)**

Relleno Sanitario	Reciclado / Composteo	Recuperación de energía	Otro tipo de valorización	Otro tipo de disposición
58	26	1	11	4

En el caso de los DSM (Figura 1.4), el 83% se deposita en rellenos sanitarios, y solamente el 9% se recicla (incluyendo composteo), además un 8% se lleva a combustión, comparado con Suiza y Holanda que reciclan alrededor del 50% de DSM (Cuadro 1.4).



**Figura 1.4. Manejo de los DSM en el Reino Unido 1998/1999 (DETR, 2000)**

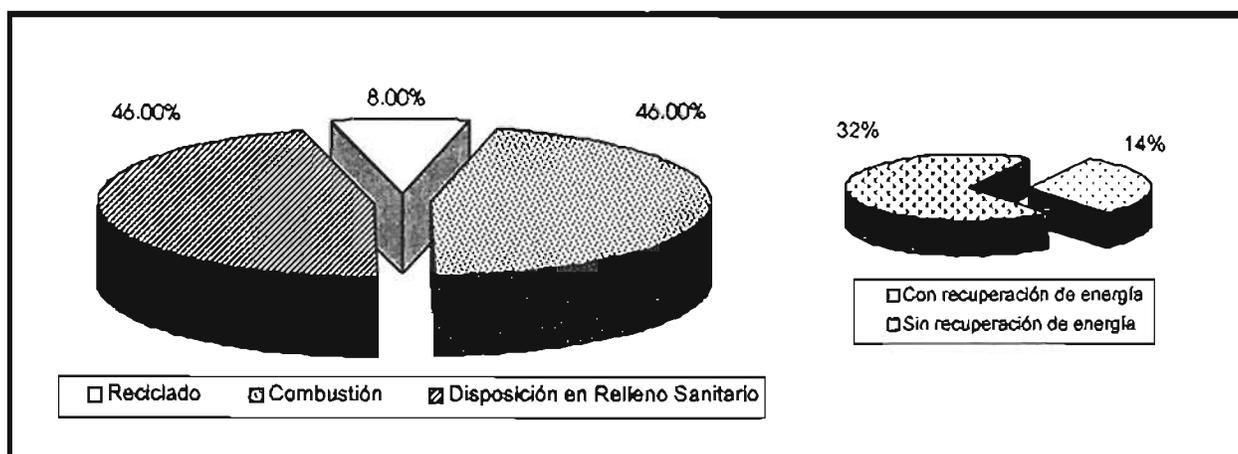
Cuadro 1.4. Países con altos índices de reciclado (Pellaumail, 2001)

País	Reciclado	Fuente
Suiza	52 % en 1998	Swiss Environment Agency
Holanda	46 % en 1998	Dutch Environment Ministry
Austria	48 % en 1996	Austrian Federal Waste Management Plan 1998
Alemania	48 % en 1996	Environment Data Germany 1998
Noruega	38 % en 1999	Statistics Norway
Suecia	34 % en 1997	Swedish EPA

## Francia

En Francia, a partir de 2002 solamente se permite la disposición en rellenos sanitarios de desechos previamente seleccionados, lo que significa que únicamente los desechos que no fueron factibles de ser reciclados o recuperados de acuerdo con las condiciones técnicas y económicas prevalecientes al momento de disponerse, se pueden depositar en rellenos (Tejdar, 1999).

Debido a esto, en la mayoría de los países de Europa, la incineración se torna como la mejor opción para el tratamiento de DSM y residuos peligrosos. Por medio de la incineración, en Francia se tratan al año 12 millones de toneladas de desechos, siendo la segunda opción para el manejo de DSM (Figura 1.5).



Nota: El gráfico de la derecha muestra el porcentaje de DSM que se llevan a combustión, con y sin recuperación de energía

Figura 1.5. Manejo de los DSM en Francia. (Tedjar, 1999)

## España

En España, los residuos sólidos urbanos (RSU) se definen en la Ley de Residuos como los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades. Asimismo, se consideran los siguientes residuos (Energética XXI, 2004):

- Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas
- Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados
- Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

### 1.3.3. Países de Asia

Se estima que la carga global de DSM en Asia era de 1.3 billones de toneladas métricas en 1990, o de dos tercios de kilogramo de basura por persona por día. Algunos estudios sobre manejo de desechos sólidos han registrado la composición de los desechos sólidos en la mayoría de las ciudades asiáticas. Las prácticas de manejo de desechos sólidos en Asia se diferencian de las occidentales en que en Asia estos son reciclados ampliamente debido al hecho de que no es "wegwerfgesellschaft" es decir, una sociedad en que todavía no se cree en "consumir y tirar" (Preceup, 1998).

Los contenidos de papel y plástico son generalmente más elevados en ciudades como Tokio y Singapur. En ciudades como Beijing y Shanghai, el contenido en ceniza y tierra es muy alto debido a la combustión de carbón y al calentamiento del espacio durante las estaciones frías mientras que la proporción de papeles, textiles y materiales ligeros es muy baja debido a la recuperación y el reciclaje. (Preceup, 1998).

En general, las naciones del sur de Asia presentan un alto porcentaje de materiales orgánicos e inertes en sus residuos, mientras que en las regiones del norte y el centro de Asia figuran más materiales sintéticos y combustibles, metales, vidrio y objetos tóxicos, como baterías.

En la mayoría de los informes sobre manejo de desechos sólidos en las ciudades del sur de Asia se destacan tasas de generación de desechos que van desde cantidades inferiores a 0.5 kg/cápita/día hasta 0.8 kg/cápita/día; en la región central los informes destacan una tasa de generación superior a 0.75 kg/cápita/día. La composición y propiedades de los desechos de algunas ciudades asiáticas se presentan en el Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5. Características de los DSM generados en algunas ciudades de Asia (Furedy, 1990)

País	Bombay	Manila	Bangkok	Kuala Lumpur	Singapur	Beijín	Shanghai	Tokio
Parámetro								
Humedad de la basura (%)	40	42.6	59.1	50.2	53.4	36.4	40.9	47.9
Combustible (%)	22	33.8	37.7	41.4	32.8	15.4	4.2	45.0
Incombustible (%)	38	23.6	5.2	8.4	13.8	48.2	54.9	7.1
<b>Composición física (por ciento en peso)</b>								
Papel	10	14.5	13.9	11.7	28.3	7.8	2.6	42.0
Vidrio	0.2	2.7	2.0	2.5	5.7	2.4	1.3	1.2
Metal	0.2	4.9	1.8	6.4	4.8	1.1	2.9	1.2
Plásticos	2	7.5	11.0	7.0	11.8	2.8	1.6	8.5
Textiles	3.6	1.3	6.9	1.3	3.0	1.4	0.3	3.8
Madera / Hierba	20	7.7	14.9	6.5	44.4	2.6	7.1	4.7
Ceniza / Tierra	20	31.8	36.5	63.7	-	29.2	31.5	32.9
Alimentos	38	6.0	12.6	0.9	2.0	48.2	51.1	0.1
Otros	62	23.6	0.4	0.0	-	4.5	1.6	5.6
Poder calorífico (kcal/kg)	800-1,000	1,468	1130	750	1388	500-600	700-800	1898

Particularmente en Asia, los países en vías de desarrollo se están transformando en un universo de ciudades y aglomeraciones. Las proyecciones más recientes indican que para el año 2020 más de la mitad de la población de estos países estará viviendo en zonas urbanas. La emigración desde zonas rurales hacia zonas urbanas en perspectiva de obtener ingresos más altos ha sido el alimento para el crecimiento de la población urbana. Sin embargo, las ciudades aún no han sido capaces de brindar mejores niveles de calidad de vida a pesar de los ingresos relativamente más altos de las poblaciones urbanas.

### 1.3.4. Argentina

El Plan Nacional de Valorización de Residuos (PNVR) de Argentina contempla los siguientes aspectos:

- La *valorización* de residuos es reconocida como una de las estrategias de protección ambiental y como tal dicha estrategia debe ser promovida por el Organismo Ambiental Nacional.

El Principio básico contempla el enfoque ambiental a los residuos a través de las siguientes premisas. *Fuente:* (Bauleo, 2002):

- El residuo puede ser *reducido* o *disminuido*, en cantidad y/o calidad, mediante procesos y pautas de producción, consumo y/o comercialización que lo minimicen y/o eliminen.
- El residuo no es siempre un *desecho* a destruir o confinar, sino también un posible *recurso* a potenciar y recuperar.
- *Valorizar* los residuos implica *optimizar sus características de forma / materia / energía*, mediante procesos, hasta hoy conocidos, de reutilización, recuperación y reciclado.

### 1.3.5. Colombia

Colombia, con una población de 43 millones, generó 25,800 toneladas diarias de DSM en 1999. En la Figura 1.6 se observa que más del 75% del manejo de los desechos se enfoca a la disposición en rellenos sanitarios.

El 75% de los desechos generados se envían a relleno sanitario o a *botaderos*. El 24% tiene otros destinos, como entierro clandestino, tiraderos sin ninguna medida de protección al ambiente, vertido en ríos o quema a cielo abierto, principalmente. Solamente el 1% de los desechos se trata mediante incineración.

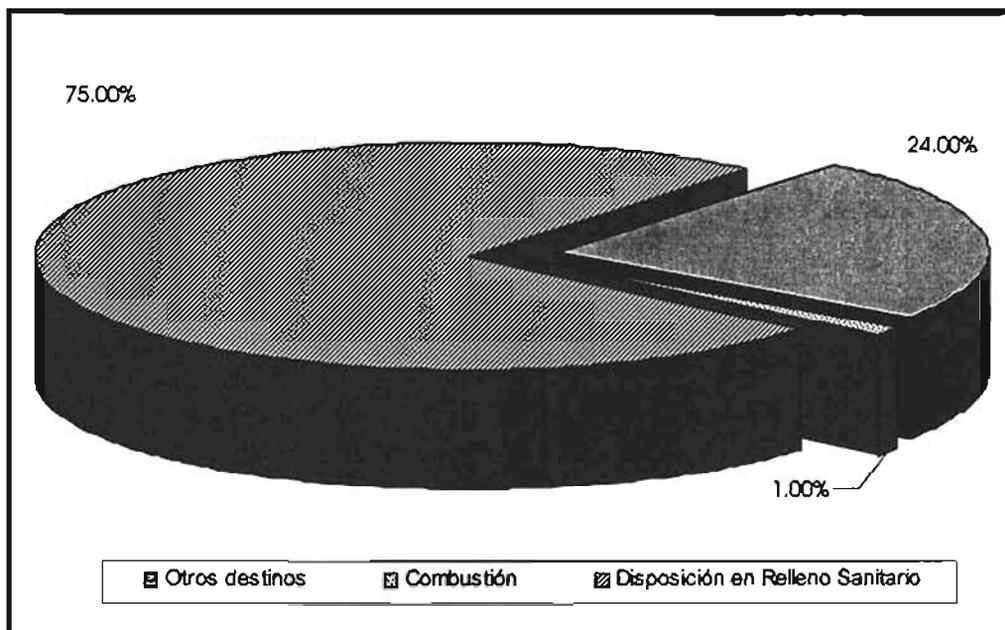


Figura 1.6. Manejo de los DSM en Colombia (1999)

Los problemas principales a que se enfrentan las autoridades en Colombia son los siguientes (Collazos, 2002):

- Dificultades para la ubicación de proyectos de disposición final, ya que “nadie los quiere cerca”
- Falta de conciencia ciudadana que comprenda que disponer los desechos adecuadamente cuesta
- Falta de personal técnico con conocimientos específicos en disposición final de los DS  
Necesidad de regionalizar el servicio
- Los pepenadores, no permiten un manejo adecuado de los DS

### 1.3.6. México

La generación de DSM en México durante el periodo de 1993 a 1998, se presenta en el Cuadro 1.6. A nivel nacional, durante este periodo se observa un aumento del 8% de los desechos plásticos.

Cuadro 1.6. Composición de los DSM, generados e México en el periodo 1993-1998 (miles de toneladas)

Subproducto	Año				
	1993	1994	1995	1996	1998
Papel, cartón, productos de papel	3,952	4,147	4,293	4,497	4,299
Textiles	419	439	455	476	455
Plásticos	1,230	1,291	1,336	1,400	1,338
Vidrio	1,657	1,739	1,800	1,886	1,803
Metales	815	855	885	927	886
Residuos de comida, de jardines y materiales similares (biodegradables)	14,719	15,444	15,987	16,747	16,009
Otro tipo de residuos (residuos finos)	5,298	5,559	5,754	6,028	5,762
<b>Total</b>	<b>28,090</b>	<b>29,473</b>	<b>30,510</b>	<b>31,959</b>	<b>30,550</b>

Fuentes: INEGI, 2005

Los métodos de disposición de los DSM son principalmente, los tiraderos a cielo abierto y los rellenos sanitarios (Figura 1.7). En el Cuadro 1.7 se presentan los principales métodos de disposición de los DSM para el periodo comprendido de 1995 a 2000. El reciclado es una práctica muy poco utilizada.

Cuadro 1.7. Disposición de los DSM en México (1995-2000) (miles de toneladas) (INEGI, 2005)

Concepto	Año					
	1995	1996	1997*	1998	1999	2000
Total de DSM generados	30,509	31,959	29,272	30,550	30,961	30,733
Recolección	21,357	22,371	22,539	25,854	25,830	25,640
Disposición final						
Rellenos sanitarios	5,952	8,573	10,270	15,877	16,429	14,490
Sitios controlados	2,555	2,606	1,657	1,007	507	2,422
Tiraderos a cielo abierto	21,796	20,564	17,126	13,459	13,815	13,613
Reciclaje	206	216	219	207	210	208

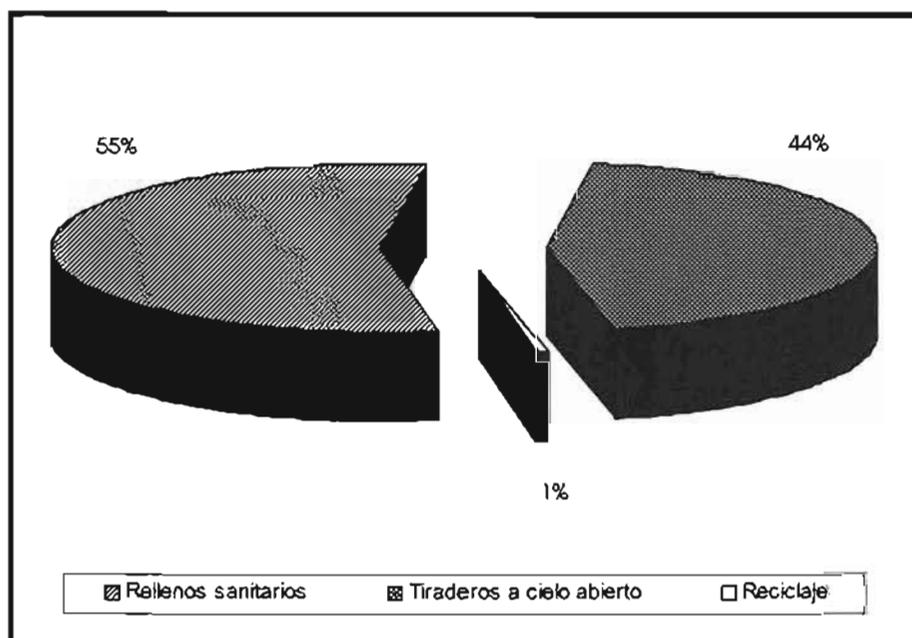


Figura 1.7. Manejo de los DSM en México

En 1979, a nivel Federal, México tuvo un gran avance en el manejo de los desechos sólidos al tomar la decisión de licitar la construcción de plantas de incineración. A finales de 1980, se adquirieron por parte del Departamento del Distrito Federal cinco plantas de incineración de tecnología suiza que se pretendieron instalar en tres sitios de la Ciudad de México:

Delegación Tlalpan, donde la construcción se interrumpió no obstante que ya se contaba con toda la obra civil; Santa Fe, la cual nunca se inició, y la tercera ubicada en el norte de la ciudad (San Juan de Aragón, Delegación Gustavo A. Madero), que fue concluida en 1989 con una de las dos líneas operativas inicialmente contempladas. Esta planta solamente operó durante dos años, periodo durante el cual no cumplió con el desempeño proyectado.

Como se puede observar, el manejo de los DSM en países de Europa y en los EEUUA, tiene una tendencia de manejo enfocada en primer lugar a la incineración, seguida por el uso de los rellenos sanitarios, en el caso de países con economías emergentes el principal destino de los desechos es el relleno sanitario o sitios a cielo abierto que no cuentan con medidas mínimas de protección al ambiente.

---

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Una nueva visión para el manejo de los DSM

#### 2.1.1. Modelo Económico-Termodinámico<sup>18</sup> aplicado a los Sistemas Integrales de Valorización de DSM

Tradicionalmente, la actividad económica se ha concebido como un conjunto de flujos monetarios que integran, a través de innumerables transacciones de diferentes agentes económicos, un circuito cerrado, aparentemente sustentable, en el que los criterios de operación son totalmente cuantitativos. Este esquema, sin embargo, encubre los aspectos físicos de la actividad económica, en la que la generación de satisfactores está inevitablemente vinculada a la utilización de materia y energía, y por lo tanto, sujeta a las Leyes de la Termodinámica. (Jacobs, 1997).

Bajo este punto de vista, la actividad económica transforma la materia y la energía de un estado a otro. Esto es, convierte a través de diversos procesos, los recursos en productos y en desechos, cumpliendo con la primera ley de la termodinámica. Asimismo, la generación de desechos en el sistema económico actual está determinada por la Segunda Ley de la Termodinámica, ya que la producción de satisfactores requiere la utilización de recursos con baja entropía y genera desechos con alta entropía, los cuales tienden hacia un alto grado de dispersión y menores posibilidades de utilización que los recursos. (*Ídem*)

Sin embargo, en la naturaleza los desechos son integrados nuevamente al ciclo, convirtiéndose en recursos por medio de un gran número de mecanismos e interacciones que involucran flujos de materia y energía, mientras que en los sistemas antropogénicos, tal y como han sido concebidos hasta ahora, se incorporan al ambiente como materiales de alta entropía y baja utilidad. (*ib ídem*). Desde el punto de vista puramente económico, bajo las condiciones prevaecientes estas características le confieren al desecho pocas o nulas

---

<sup>18</sup> Guzmán M., et al. 1999

posibilidades de ser valorizado. En este sentido, un aspecto crucial para la generación de una economía sostenible es, en principio, cómo lograr una *reducción en la generación de desechos* (reducción en la fuente) y en segundo lugar cómo *reintegrar los desechos generados al ciclo productivo* (US-EPA, 2003), optimizando tanto los aspectos termodinámicos y ambientales como los financieros (Figura 2.1).

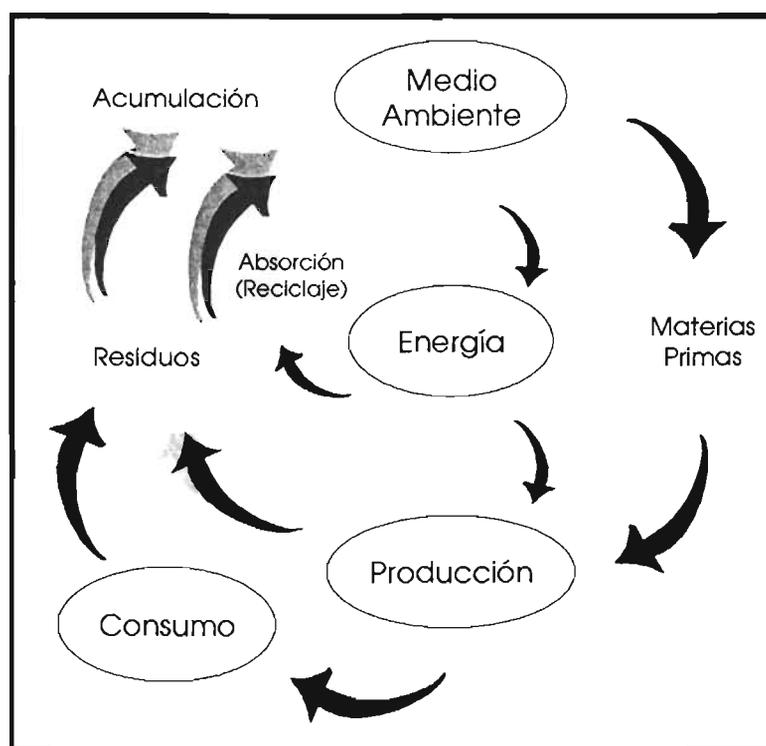


Figura 2.1. Modelo Económico-Termodinámico (Guzmán M., 1999)

De esta forma, los Sistemas Integrales de Valorización (SIV) de desechos deben planearse para tratar los desechos generados por los municipios, así como para aquellos de origen industrial que por su volumen y composición representen el mayor riesgo para el ambiente y la población. Los subproductos obtenidos a partir de los desechos deben contar con un mercado importante y un precio competitivo considerando los costos de manejo. No se deben elaborar productos que no tengan una certeza de posicionamiento en el mercado, debido a que se invierten recursos para generar nuevos desechos. En el caso de los

desechos con APC como fuente de energía, es importante que existan condiciones para la venta de ésta. Por lo tanto, el costo de los procesos de valorización, considerando la energía y los recursos invertidos no debe ser mayor al valor del producto. Por ejemplo, es común producir composta a partir de la basura que no tiene mercado por los altos costos de transporte o por su baja calidad. También se reciclan plásticos sin contar con procesos adecuados, generando contaminación y produciendo materiales de baja calidad. Por otro lado, se han implementado procesos de reuso o reciclado que causan mayor impacto ambiental que el propio desecho.

Para implementar los SIV de desechos se requiere un marco legal que estimule la venta de energía o combustibles para que se reorienten las inversiones que actualmente se dedican a la construcción de rellenos sanitarios y confinamientos. También se necesitan realizar cambios en los reglamentos para facilitar el manejo conjunto de los desechos municipales con aquellos de origen industrial que se clasifican como peligrosos "*Clasificación de los desechos con base en el enlace químico*" (Gutiérrez, 1999). A diferencia de los rellenos sanitarios, cuyas ganancias se obtienen mediante cuotas y subsidios municipales, que en ocasiones se envían a fondo perdido, los ingresos de los SIV provienen principalmente de la venta de productos, por lo que requiere certidumbre en el entorno legal y económico durante plazos relativamente largos (15 a 20 años). Es esencial establecer mecanismos de concertación entre las dependencias involucradas, de manera de lograr establecer políticas coherentes de manejo de desechos, otorgamiento de fondos para infraestructura y comercialización de la energía.

### **2.1.2. Clasificación de los desechos con base en el enlace químico<sup>19</sup>**

Los desechos generados por la actividad humana se han clasificado tradicionalmente de acuerdo a su origen y/o por los efectos sobre los seres vivos y el ambiente. Sin embargo, no son esas las características que van a permitir manejarlos en forma adecuada, sino por su naturaleza química, la cual puede ser analizada a través de valores termodinámicos, y de las

<sup>19</sup> (Gutiérrez M., 1994; Gutiérrez M., 1999)

propiedades de los elementos que conforman los compuestos. No obstante, debido a la dificultad que implica contar con datos confiables de los compuestos que forman cierto tipo de residuos e interpretarlos correctamente, conviene clasificar los desechos con base en el enlace químico que presentan los compuestos o elementos que los conforman (Gutiérrez, 1994).

Por lo tanto, la clasificación con base en el enlace químico permite manejar conjuntamente a todos aquellos desechos de una región, no importando si proceden de una casa o si fueron generados en una fábrica. Esto es, si un disolvente proviene de un hogar, de un taller de hojalatería y pintura para automóviles, de una tintorería o de alguna industria, simplemente se clasifica como compuesto orgánico. Este tipo de criterio es similar al que se aplica en los alimentos donde se clasifican por grupo bioquímico (proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas y minerales), no importando su procedencia (Gutiérrez M., 1999).

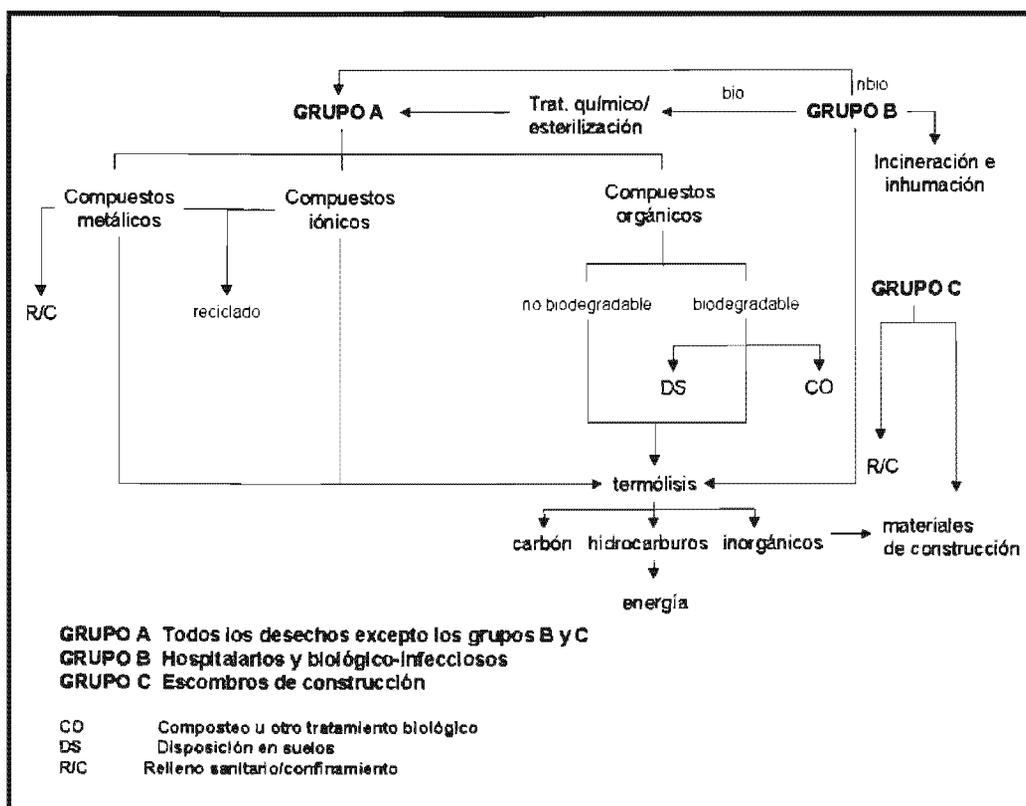
Sin embargo, hay dos grupos de desechos que conviene coleccionar, transportar y tratar separadamente: los biológicamente activos y los escombros de construcción. Por lo tanto para la planeación de un SIV de desechos se consideran independientemente los siguientes grupos (*ídem*):

- Grupo A: todos los desechos sólidos municipales generados y que no pertenecen a los grupos B y C
- Grupo B: desechos hospitalarios
- Grupo C: escombros de construcción

El Grupo A, que comprende la mayor parte de los desechos, se subdivide en compuestos: metálicos, iónicos, orgánicos con bajo poder calorífico (BPC) y orgánicos no polares con alto valor calorífico (APC). Los orgánicos de BPC se subdividen en biodegradables y no biodegradables. El criterio químico permite definir qué especie o cuáles son las que dominan el comportamiento de un desecho para clasificarlo en el grupo adecuado. No conviene

mezclar líquidos orgánicos con los DSM ya que se afecta la recuperación de los valores tradicionales como el vidrio, el papel, los metales, el trapo, etc.). Las técnicas de composteo o disposición en suelos solamente se aplican a desechos orgánicos biodegradables libres de sales, plaguicidas o cualquier otro contaminante que no alteren de forma adversa los procesos naturales del suelo.

En la Figura 2.2 se muestran todos los grupos y subgrupos mencionados con una evaluación de las sustancias inorgánicas y metálicas de acuerdo a su grado de solubilidad y/o reactividad. Además, se proponen tecnologías "amables" para la revalorización o manejo seguro de cada grupo de desechos, y se incluyen tratamientos opcionales de carácter tradicional como el relleno/confinamiento o la incineración para el caso de los residuos hospitalarios y/o biológico infecciosos activos (Gutiérrez, 1999).



NOTA: Asimismo se puede generar energía a partir de los materiales del Grupo C y de los biodegradables

Figura 2.2. Clasificación de los desechos con base en el enlace químico (Gutiérrez M., 1999)

Para seleccionar los tratamientos se utilizan criterios químicos y termodinámicos. Los compuestos orgánicos y metales deben someterse a tratamientos reductores evitando procesos oxidantes y/o altas temperaturas ( $> 800^{\circ}\text{C}$ ), mientras que los desechos inorgánicos se transforman en materiales con valor comercial o en especies estables que no representan riesgo para el entorno.

Los desechos hospitalarios (Grupo B) se sujetan a un tratamiento que elimine los organismos patógenos presentes (para los que los contengan). Se prefieren métodos que no exigen temperaturas muy altas, como es la esterilización. Los materiales plásticos y metálicos ya libres de gérmenes pueden integrarse al grupo A para su valorización, pero si la normatividad del país lo exige deben incinerarse junto con los órganos humanos y animales, e intervenir con información para que en las revisiones periódicas de la misma se considere que esta solución no es la adecuada.

Los escombros provenientes de edificaciones (Grupo C) pueden ser revalorizados fabricando materiales de construcción o pueden confinarse en un sitio adecuado, considerando que los componentes de este tipo de desechos no son reactivos pero pueden salinizar el entorno, así como modificar la estabilidad del terreno donde se depositen. El material de préstamo para cubrir las celdas debe provenir de zonas seleccionadas con base en estudios que minimicen el impacto al ambiente.

### **2.1.3. Combustible derivado de desechos**

Durante la gestión integral de los DSM es necesaria la clasificación química de los mismos para aprovechar con mayor eficacia su PC, debido a esto es necesaria su preparación a partir de "*como se reciben*", mediante la separación de componentes no combustibles e inertes además de materiales peligrosos o tóxicos, solventes, pilas, etc. Mediante este procedimiento se recuperan además, materiales con valor económico que se pueden

reciclar, como el aluminio, metales ferrosos, vidrio y diferentes tipos de papel, cartón y periódico, principalmente (Juniper, 2001).

La fracción orgánica no biodegradable<sup>20</sup> resultante y con APC, cuando es triturada se conoce como *combustible derivado de desechos*, CDD (en inglés: refuse derived fuel, RDF).

El CDD se puede producir mediante diferentes procesos que consisten generalmente en:

- Separación en la fuente
- Selección manual o mecánica
- Reducción del tamaño mediante trituración
- Separación y cribado
- Homogenización y mezclado
- Secado y peletizado
- Empacado y,
- Almacenado

Los principales beneficios derivados del uso del CDD sobre los desechos sin separación previa son los siguientes:

- Se puede procesar el CDD y almacenarse durante largos periodos de tiempo
- La eficiencia de los procesos aumenta cuando el material se seca
- Las tecnologías basadas en el aprovechamiento del CDD permiten la recuperación de materiales con valor comercial

---

<sup>20</sup> Básicamente derivados de hidrocarburos, como plásticos, hules, aceites gastados, etc.

En el Cuadro 2.1 se presentan las propiedades del combustible derivado de desechos.

**Cuadro 2.1. Propiedades típicas del CDD (European Commission, 2003)**

Propiedad	Valor
Contenido de agua, por ciento en peso	7 - 28
Contenido de ceniza, por ciento en peso de MS	12.0
Materia volátil, por ciento de MS	68
Carbón activado, por ciento, MS	10
Poder calorífico, MJ/kg MS	18.7 (4,466 kcal/kg)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) MS	75-600

MS: material seco

#### 2.1.4. Tecnologías “Desecho a Energía”

*Desecho a energía* DAE, (en inglés: waste to energy, WTE), es el término utilizado para referirse al conjunto de tecnologías para la valorización del CDD mediante su tratamiento bajo condiciones controladas, a través del cual se recupera energía renovable en forma de electricidad y/o calor, y se aplica tanto a la combustión de los desechos municipales o a la recuperación en la fuente (ESA, 2004).

En las tecnologías DAE, como parte de los sistemas integrales de valorización (SIV), se aprovecha el calor generado por el procesamiento<sup>21</sup> del CDD y que es absorbido mediante intercambiadores de calor que en su interior conducen agua, o en calderas separadas. El agua se calienta a su punto de ebullición pasando a vapor. En ese punto, el vapor se utiliza para calentar o como impulsor de turbinas para generar electricidad y en algunos casos hay 'cogeneración' de electricidad y del vapor.

Más adelante se hablará de los procesos de gasificación y pirólisis que además de la incineración, aprovechan el CDD para emplearlo en tecnologías DAE.

<sup>21</sup> Incineración, gasificación y pirólisis, principalmente.

## 2.1.5. Poder Calorífico y su determinación experimental

### CONCEPTOS

#### *Caloría*

La *cantidad de calor* en el Sistema Internacional de unidades se mide en joules (J), sin embargo otra medida muy utilizada es la caloría (cal). La caloría es el calor necesario para incrementar la temperatura de 1g de agua destilada de 14.5 a 15.5 °C a presión atmosférica estándar. El físico inglés J. Joule (1818-1889) encontró que 1cal es equivalente a 4.1855J. Las calorías o kilocalorías (kcal) se utilizan para expresar la energía contenida en los alimentos (Atkins, 1986).

#### *Poder Calorífico*

El *poder calorífico*, es la principal característica de los combustibles, y representa la cantidad de calor desprendido en una reacción de combustión en condiciones estándar predefinidas. Generalmente se mide en kcal/kg para sólidos y líquidos, mientras que para los gases en kcal/m<sup>3</sup>.

En muchos combustibles que contienen hidrógeno es necesaria la diferencia entre el Poder Calorífico Superior, también denominado Poder Calorífico Total, que es el calor producido en la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido bajo volumen constante, dentro de una bomba calorimétrica en condiciones específicas, tales que toda el agua de los productos permanezca en estado líquido, y el Poder Calorífico Inferior ó Poder Calorífico Neto, que se calcula a partir del Poder Calorífico Total y equivale al calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de un combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en forma de vapor, (NMX-AA-033-1985).

Para medir el poder calorífico de combustión de algún combustible se utiliza las unidades:

Sistema Internacional: [J/ kg]

Sistema Inglés: [BTU/ lb]

El poder calorífico de cualquier combustible es calculable a partir de las entalpías de formación de sus componentes (Cuadro 2.2). No obstante, la mayoría de los combustibles empleados en la industria y los componentes de los DSM, son mezclas complejas de diversos compuestos, lo que no hace tan directo lo expuesto anteriormente debiéndose medir el "Poder Calorífico de Combustión" de forma experimental, siguiendo procedimientos cuidadosamente normalizados.

**Cuadro 2.2. Poder calorífico de diferentes combustibles fósiles (Fuente: EIA, 2005)**

Combustible	Poder calorífico [kcal/kg]		
	IEA <sup>(a)</sup>	EUROSTAT <sup>(b)</sup>	Rango típico <sup>(a) y (b)</sup>
Coque de petróleo	7,509	7,409	7,128 - 10,211
Lubricantes	10,115	9,611	8,409 - 10,263
Aceite	9,565	9,611	9,405 - 10,036
Diesel	10,115	10,362	9,995 - 10,416
Queroseno	10,282	10,663	10,235 - 11,646
Aviation Gasoline	10,522	10,713	10,043 - 10,769
Turbosina	10,522	10,713	10,156 - 10,715
Etano	11,956	11,313	10,808 - 12,450
Gas de refinería	11,956	11,513	6,672 - 12,435

<sup>(a)</sup> International Energy Agency, Energy Statistics Division

<sup>(b)</sup> Statistical Office of the European Communities

### *Poder Calorífico de Combustión*

El "Punto de Rocío" o "Temperatura de Rocío" para una combustión se puede entender como la temperatura a la cual se deben bajar los productos de esta, para poder obtener agua líquida. Es decir, en una misma mezcla combustible se encontrarán poderes caloríficos distintos, según sea el estado de humedad de los productos. Típicamente se encuentra esta temperatura alrededor de los 25 °C.

El Poder Calorífico "Inferior" (PCI) y "Superior" (PCS), en relación al estado en que se encuentre el agua de los productos de la combustión. En el primer caso hay un proceso de combustión a presión constante, en el se define el PCI como el calor entregado al entorno cuando una unidad de combustible en condiciones de referencia se quema completamente, en estado de régimen permanente, de tal manera que los productos salen también en condiciones de referencia y la totalidad del agua producida por la combustión del hidrógeno está en estado de vapor. De igual forma se define el PCS, pero ahora considerando que la totalidad del agua producida por la combustión del hidrógeno está como líquido.

De lo anterior, se define, según el estado de humedad de los reactantes:

- Poder calorífico inferior PCI

Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible, quedando finalmente el agua en la combustión en forma de vapor.

- Poder calorífico superior (PCS)<sup>h</sup>

Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible, quedando finalmente el agua formada en la combustión en forma líquida a 0°C y a 1 atm (kcal / unidad de combustible).

### **Métodos de medición**

Para la determinación experimental del *poder calorífico de combustión* hay dos métodos dependiendo el estado físico en que se encuentre la muestra a analizar (Ebbing, 1996):

1. *Calorímetro a presión constante*, para combustibles líquidos y sólidos
2. *Calorímetro a volumen constante*, para combustibles gaseosos

A continuación se describen los principios teóricos de cada equipo.

### *Calorímetro a presión constante*

En las determinaciones de *calor a presión constante*, se trabaja con dispositivos que no están sellados y por lo tanto las mediciones se efectúan en condiciones de presión atmosférica constante, aunque se considera que no hay pérdida de calor hacia el exterior.

Este calorímetro se utiliza para medir los cambios de calor en reacciones de neutralización ácido-base, calores de disolución y calores de dilución.

El cambio de calor ( $q$ ) del proceso ( $q_{reacción}$ ) es igual al cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) y puede calcularse a partir del cambio de temperatura y de la capacidad calorífica de la disolución y del calorímetro:

$$q_{sistema} = q_{disolución} + q_{calorímetro} + q_{reacción}$$

$$q_{sistema} = 0$$

$$q_{reacción} = -(q_{disolución} + q_{calorímetro})$$

$$q_{disolución} = m_{disolución} s_{disolución} \Delta T = C_{disolución} \Delta T$$

$$q_{calorímetro} = m_{calorímetro} s_{calorímetro} \Delta T = C_{calorímetro} \Delta T$$

En la Figura 2.3 se muestra el dispositivo que mide el poder calorífico de un combustible a presión constante. En este caso, la reacción de combustión se produce a 1 atm y como refrigerante se utiliza agua, misma que se puede regular (tanto su caudal y como su temperatura), para que los productos salgan a una temperatura de 25°C. De esta forma, si los reactantes entran también a 25°C, y si se ignoran las pérdidas de calor al entorno, por definición el poder calorífico es igual al calor entregado al refrigerante. Esta energía se calcula como el producto del flujo másico del agua por su diferencia de entalpía. Aquí que la entalpía es una función sólo de la temperatura ya que los gases se comportan como ideales a bajas presiones.

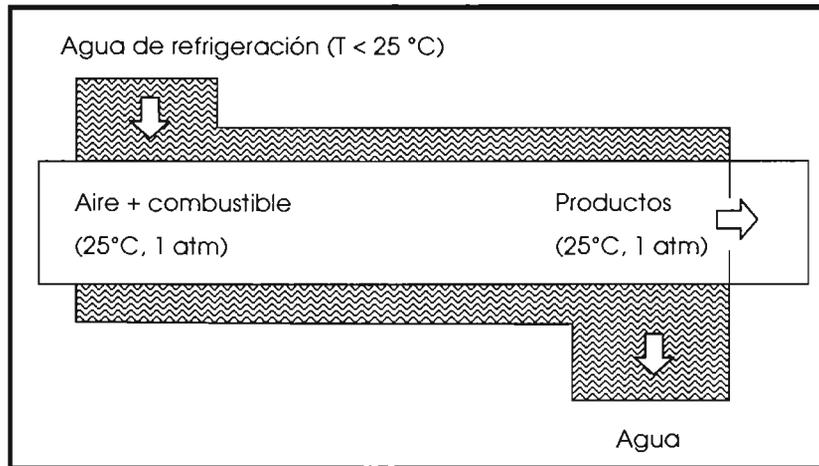


Figura 2.3. Calorímetro a Presión Constante

### Calorímetro a volumen constante

Las *determinaciones de calor a volumen constante* se realizan en sistemas aislados (ver Figura 3.12), y se determina el calor liberado por una cierta cantidad de masa cuando ésta se quema en una bomba cerrada que se sumerge en una cantidad de agua conocida. El calor ( $q$ ) liberado por la muestra es absorbido por el agua y el calorímetro, por lo que el calor total de sistema es:

$$q_{\text{sistema}} = q_{\text{agua}} + q_{\text{bomba}} + q_{\text{reacción}}$$

$$q_{\text{sistema}} = 0$$

Donde:

$q_{\text{agua}}$ ,  $q_{\text{bomba}}$  y  $q_{\text{reacción}}$  son los cambios de calor del agua, de la bomba y de la reacción, respectivamente, por lo que el calor de la reacción es:

$$q_{\text{reacción}} = -(q_{\text{agua}} + q_{\text{bomba}})$$

Donde:

$$q_{\text{agua}} = m s \Delta T = (m_{\text{agua}}) (4.184 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}) \Delta T$$

y

$$q_{\text{bomba}} = m s \Delta T = C \Delta T$$

Este equipo consta un recipiente rígido de volumen  $V$  (determinado) refrigerado por agua. En el interior del mismo se coloca el combustible a analizar junto con oxígeno para asegurar la combustión completa. Todo el sistema, que se encuentra a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , encerrado con una pared adiabática donde se utiliza una chispa para encender el combustible. Al concluir este proceso se mide la temperatura. Después se quita el aislante adiabático de modo que el sistema alcance los  $25^{\circ}\text{C}$ , que tenía antes de la combustión.

Este calorímetro se utiliza para medir los cambios de calor en reacciones de neutralización ácido-base, calores de disolución y calores dilución. El cambio de calor del proceso ( $q_{\text{reacción}}$ ) es igual al cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) y puede calcularse a partir del cambio de temperatura y de la capacidad calorífica de la disolución y del calorímetro

Con la temperatura medida luego de la combustión es posible obtener el valor del poder calorífico del combustible al igual que en el sistema anterior.

Experimentalmente se ha observado que la diferencia en la medición del poder calorífico, para un combustible determinado, no supera el 1% entre un método y otro por lo que no se acostumbra hacer diferencia entre estos dos métodos en la práctica

En la Etapa Experimental de este trabajo, la determinación de poder calorífico se realizó en un calorímetro a volumen constante.

### 2.1.6. Poder Calorífico de los DSM

En los DSM el poder calorífico alto proviene de los materiales derivados de los hidrocarburos, como plásticos mezclados: polietileno, polietilén tereftalato (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS), principalmente (Hernández-González, 1997). En el Cuadro 2.3 se presenta el poder calorífico típico de los principales componentes de los desechos sólidos municipales.

**Cuadro 2.3. Poder calorífico típico de los principales componentes de los DSM<sup>22</sup> (Tchobanoglous, 1993)**

Material	Poder calorífico (PC) [cal/g]	
	Como recogido	Seco
Residuos de comida	998	3,324
Cartón	3,912	4,127
<i>Plásticos (mezclados)</i>	<i>7,834</i>	<i>7,995</i>
<i>Polietileno</i>	<i>10,382</i>	<i>10,402</i>
Residuos de jardín	1,445	3,613
Vidrio y mineral*	47	48
Metal, latas de hojalata	167	177

\* El contenido energético es de recubrimientos, etiquetas y materiales adjuntos

En estudios realizados por la Comunidad Económica Europea (CEE), se pueden observar ciertas tendencias en la composición de los DSM, relacionándose con los plásticos (Muñoz, 1980):

<sup>22</sup> Como se observa, la fracción de los desechos que les confiere un alto poder calorífico a los desechos es aportada por los plásticos, principalmente.

- Disminución de los materiales fermentables, de las cenizas y de los finos
- Aumento de los materiales no biodegradables
- Incremento de los materiales combustibles (envases y embalajes de cartón y de plástico)

En el Cuadro 2.4 se presenta la evolución de las características de los DSM en la CEE.

**Cuadro 2.4. Evolución de las características de los desechos sólidos municipales mezclados para la CEE**

Subproducto (% en peso)	Año		
	1960	1970	1980
Materiales plásticos	1	3	6
Metales	4	6	9
Vidrio	5	7	9
Papel y cartón	33	37	45
Arena, tierra cenizas	40	32	18
Vegetales y restos de alimentos	10	8	7
Diversos no clasificados	7	7	6
Densidad aparente (kg/dm <sup>3</sup> )	0.34	0.29	0.25
Poder calorífico (cal/kg)	1,300	1,600	2,300

El contenido en plásticos ha pasado del 1% en 1960 al 3% en 1970, en 1980 se consideró del 6%. Además de la evolución del contenido de plásticos, se presentan las siguientes características (Muñoz, 1980):

- La densidad de los desechos tiende a disminuir, lo que se explica por el aumento importante de envases y embalajes ligeros y por la reducción de las cantidades de cenizas
- El poder calorífico de los DSM era en 1960 de aprox. 1300 cal/g, en 1970 aumentó a 1600 cal/g y en 1980 de 2300 cal/g. Este cambio se debe al aumento de los productos combustibles (papel, cartón y, sobre todo, materiales plásticos).

Los datos de Cuadro 2.4 varían mucho de un país a otro, en el Cuadro 2.5 se puede observar que, con la excepción de los EEUA e Italia, los países con alto consumo en plásticos producen igualmente altos porcentajes de DSM.

**Cuadro 2.5 Fracción de los plásticos en los DSM en diferentes países (Muñoz, 1980)**

<b>País</b>	<b>Generación de desechos (kg/hab/año)</b>	<b>Contenido en plásticos (% peso)</b>
Australia	56	2
Austria	275	4-6
Canadá	1000	2.5
Alemania	400	5
Finlandia	130	5
Francia	250	5.5
Irlanda	370	1.5
Italia	800	2
Japón	300	7
Holanda	525	7.7
Noruega	200	5.7
España	234	5
Suecia	450	8
Suiza	275	4
Inglaterra	323	3.5
EEUUA	770	3

En los EEUUA, se prefiere el uso de bolsas de papel en lugar de bolsas de plástico para realizar compras, sin embargo el dato presentado no concuerda con los hábitos del consumidor norteamericano. Con respecto al dato de Italia, es muy diferente ya que tan solo en Roma, los plásticos representan un 4% en la composición de los desechos.

Las cifras son muy difíciles de establecer, ya que los DSM son materiales mal definidos, heterogéneos, muy variables y de diferentes procedencias. Su composición es muy diferente

según provenga de un núcleo urbano o rural, de una época del año, de condiciones económicas, de costumbres, de una zona con desarrollo o subdesarrollada (Muñoz, 1980).

En un estudio realizado por Beede and Bloom en 1995, reportan un valor del 9.8 por ciento en peso de los materiales plásticos contenidos en los DSM de los EEUA en 1990 (Cuadro 2.6). El valor señalado por Muñoz en 1980 era del 3% en peso (ver Cuadro 2.5).

**Cuadro 2.6. Composición de los DSM en porciento en peso en diferentes países (Beede and Bloom, 1995)**

Subproducto	Bangkok (1989)	Dar es Salaam (1988)	Yakarta (1989)	Ciudad de México (1980)	EEUA (1990)
Papel	12.4	6.2	2	19.2	32.3
Residuos de alimentos	39.2	62.5	60	43.1	8.1
Textiles	3.2	1.8	-	5.7	3.3
Plásticos	9.4	0.3	2	5.0	9.8
Piel/Hule	1.9			ND	2.7
Metales	1.7	1.2	2	3.7	7.7
Vidrio	3.2	0.3	2	8.4	6.5
Misceláneos	29.0	27.7	32	14.9	29.6
Humedad	31	44	42	34	20
Poder calorífico (kcal/kg)	2,699	1,504	1,433	2,125	3,081

ND , información no disponible

En México, de acuerdo a datos de la Semarnat (1999), el porcentaje en peso de los desechos plásticos durante el periodo de 1974 a 1988 fue de 3.42; y de 1991 a 1998, pasó a ser del 3.92 porciento en peso (Cuadro 2.7).

**Cuadro 2.7. Composición de los DSM en México en los periodos 1974-1988 y 1991-1998 (Semarnat, 1999)**

Subproductos	Periodo 1974-1988 (por ciento en peso)	Periodo 1991-1998 (por ciento en peso)
Papel	9.63	11.96
Residuos de alimentos	34.70	27.56
Textiles	1.94	1.60
Plásticos	3.42	3.92
Metales	0.76	0.95
Vidrio	3.44	2.37
Cartón	4.10	4.07

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2005), reporta que en el año 2004, la generación de plásticos fue del 6.12 por ciento en peso (Cuadro 2.8). Las cifras del INEGI, establecen un porcentaje del 4.38 por ciento en peso de plásticos que formaron parte de los DSM en el año 1998.

Los datos reportados por la SEMARNAT (1999) (ver Cuadro 2.7), y por el INEGI (2005) (Cuadro 2.8), para el año 1998 difieren casi en un 0.5 por ciento en peso, que equivale a 152,750 toneladas de plásticos con base en la generación reportada por el INEGI (2005), que es de 30'550,000 toneladas de DSM generadas en el país durante ese año.

**Cuadro 2.8. Composición de los DSM en México 1995 a 2004 (valores en porciento en peso), (INEGI, 2005)**

Subproducto	Año									
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Papel + cartón	14.07	14.07	14.07	14.07	14.07	14.07	14.07	14.07	14.91	14.91
Basura de comida, de jardines	52.40	52.40	52.40	52.40	52.40	52.40	52.40	52.40	50.40	50.40
Textiles	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.50	1.50
Plásticos	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	6.12	6.12
Metales	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	3.18	3.35
Vidrio	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	2.72	5.90	6.56	6.39

Fuente: Tomado y modificado para obtener el porciento en peso de los desechos del Cuadro: "Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de basura, 1995-2004", (INEGI, 2005)

Notas: Debido al redondeo de cifras la suma de los parciales puede no coincidir con el total

En la Ciudad de México en 1980, con base a datos de Beede and Bloom (1995), el porciento en peso de los plásticos en los DSM fue de 5.00. A nivel nacional la Semarnat (1999), reporta para el periodo que abarca este año, 1974 a 1988, un porcentaje en peso de materiales plásticos de 3.42.

Con respecto a datos del poder calorífico de los DSM en México, la información es limitada y se centra principalmente a datos generados en la Ciudad de México. De acuerdo con datos facilitados por la Dirección Técnica de Desechos Sólidos de la Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del Distrito Federal, los análisis realizados a cuatro muestras recolectadas en tres diferentes estaciones de transferencia<sup>23</sup>, reportan una humedad promedio del 42.57 porciento y un poder calorífico promedio de 3,313 kcal/kg. En el Cuadro 2.9 se presentan los resultados.

<sup>23</sup> Las estaciones de transferencia son lugares intermedios entre la zona de recolección y el sitio de disposición final de los desechos. En ellas, los camiones recolectores vacían los desechos en tractocamiones de mayor capacidad, que equivalen aproximadamente a cinco vehículos recolectores, para que los mismos sean depositados en el sitio de disposición final.

**Cuadro 2.9. Humedad y Poder calorífico de los DSM en estaciones de transferencia (GDF, 2002)**

Número de muestras	1	1	1	1	Promedio
Delegación de Origen	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	Cuauhtémoc	Venustiano Carranza	
Humedad (% en peso)	43.33	42.04	44.83	40.11	42.57
Poder Calorífico (kcal/kg)	3,089	2,914	3,852	3,395	3,313

En el Cuadro 2.10 se presentan los valores de humedad y de poder calorífico determinados a una muestra tomada en el sitio de disposición final Bordo Poniente del Gobierno del Distrito Federal. Como se observa, el porcentaje en peso de humedad es de 32.84, un 10% menor con respecto al promedio presentado en las estaciones de transferencia. El valor del poder calorífico determinado es de 2,400 kcal/kg

**Cuadro 2.10 Humedad y Poder Calorífico de una muestra de DSM tomada en Bordo Poniente**

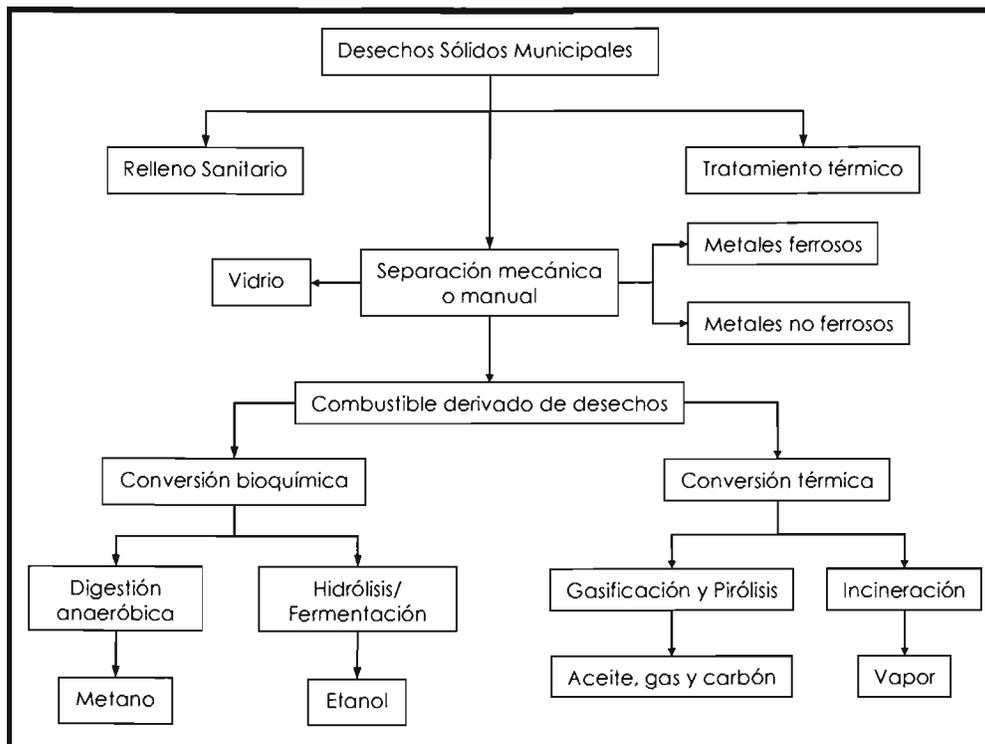
Número de muestras	1
Sitio	Bordo Poniente
Humedad (% en peso)	32.84
Poder Calorífico (kcal/kg)	2,400

## *2.2. Tecnologías térmicas para la valorización de desechos con APC*

En la tendencia para encontrar soluciones limpias (tecnologías limpias y amables con el medio ambiente), se adoptaron principios de generación de energía relativamente conocidos como la termogeneración, para aplicarlos a la valorización de los DSM, desarrollando tecnologías económicamente y ambientalmente viables, entre ellas la gasificación y la pirólisis.

Estas tecnologías se basan en la transformación química de los desechos a sustancias líquidas y gaseosas, utilizando energía calorífica procedente de la combustión de los mismos desechos (mediante temperatura). Durante el proceso se controlan las condiciones oxi-reductoras (cantidad de aire) para que los desechos reaccionen y forme compuestos con alta energía interna (combustible). Mediante un motor de combustión interna puede generarse energía eléctrica, calor y/o pueden recuperarse diversos subproductos, como: amoniaco, nitrógeno, hidrógeno, etc. Cuando por ejemplo, si al proceso se alimentan llantas, se puede generar diesel, materiales asfálticos, etc. (Kumar, 2000).

En la Figura 2.4 se presentan las opciones para la generación de energía a partir de DSM, en ella se observa que a partir del combustible derivado de desechos (CDD), se puede hacer una conversión bioquímica o conversión térmica para generar energía. Debido a que este trabajo se enfoca a procesos que conllevan una conversión térmica de los desechos, únicamente se tratarán la gasificación y la pirólisis como tecnologías alternativas a la incineración.



**Figura 2.4 Opciones para la generación de energía a partir de DSM (Kumar, 2000)**

Las tecnologías térmicas desecho a energía (DAE), se pueden agrupar en tres categorías:

- I. Combustión (incineración) directa de los DSM sin previa clasificación,
- II. Preparación e incineración directa del CDD,
- III. Pirólisis y gasificación.

En el Cuadro 2.11 se presentan los principales aspectos de las tecnologías térmicas que se utilizan para aprovechar la fracción de los DSM con alto poder calorífico. Como se mencionó en la Sección 1.2.3, en general los procesos de incineración no requieren de una separación o selección previa de los desechos, de esta forma se incluye la materia orgánica biodegradable; en cambio, los procesos de gasificación y pirólisis necesitan, con el objetivo de mejorar sus eficiencias de la siguiente preparación: selección y separación para obtener el CDD, trituración y secado.

Cuadro 2.11. Principales aspectos de los procesos de conversión térmica

Proceso térmico	Tipo de proceso	Productos intermedios	Principales productos	Subproductos
Combustión	Reacción de flama, oxidación completa	Gases de combustión, vapor	Vapor electricidad	Ceniza residual, residuos derivados de la limpieza de gases
Gasificación	Oxidación parcial	Gas de síntesis <sup>24</sup>	Electricidad, compuestos químicos	Ceniza, alquitrán, residuos derivados de la limpieza del gas
Pirólisis	Calentamiento externo, ausencia de oxígeno, degradación térmica de materiales orgánicos sólidos	Aceite	Electricidad, compuestos químicos	Carbón, gas de síntesis
Gasificación térmica	Pirólisis a alta temperatura	Gas de síntesis	Electricidad, compuestos químicos	Carbón, alquitrán, residuos sólidos limpios

En términos generales las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de Gasificación y Pirólisis (Juniper, 2001) son:

#### *Ventajas*

- Rentabilidad: ya que a diferencia de la incineración que requiere de una instalación de capacidad fija, en general estos procesos que puede crecer su capacidad mediante módulos de diferentes capacidades de procesamiento,

<sup>24</sup> El gas de síntesis o syngas se produce por la descomposición térmica de la materia orgánica mediante los procesos de gasificación y de pirólisis. El gas es rico en metano, hidrógeno y monóxido de carbono y puede ser utilizado como combustible alternativo o directamente para generar electricidad (DEFRA, 2005)

- 
- Economía: minimiza el gasto de energía, ya que no requiere una alimentación de aire en exceso para que las reacciones termoquímicas se lleven a cabo completamente,
  - Ecología: no produce emisiones contaminantes a la atmósfera por ser un ciclo cerrado, en el cual las variables de proceso evitan la formación de compuestos tóxicos
  - Diversidad de procesamiento de desechos industriales y de uso doméstico como: plásticos, llantas, aceites gastados
  - Reducción y reciclado: el volumen original se puede reducir hasta en un 90%, cuando se instrumenta un programa de reciclado
  - El proceso genera menor cantidad de cenizas que la incineración
  - Las cenizas se utilizan para fabricar ladrillos, bloques o mejorador de arcillas, debido a que los metales, durante el proceso, se transforman a especies estables

#### *Desventajas*

- Algunas tecnologías necesitan que los DSM sean seleccionados y preparados antes de integrarse al proceso, debido a que todavía no hay implementados sistemas eficientes de separación de desechos en *la fuente* por parte de las instancias encargadas de la recolección.
- Se requieren tamaños de partícula específicos (trituration previa) y preparación del material (secado)
- Algunas tecnologías se encuentran en etapas experimentales o piloto, en algunos casos hay tecnologías a nivel comercial, pero se limitan a ciertos tipos de desechos,
- Los volúmenes a tratar son menores a los que pueden procesarse mediante incineración
- El costo de los equipos es alto

En las siguientes secciones se presentan los fundamentos del proceso de gasificación y de pirólisis, los tipos de equipos, así como los parámetros de operación y ventajas.

### 2.2.1. Gasificación

La gasificación es el término general utilizado para describir el proceso de combustión parcial en el que un combustible es quemado con una menor cantidad de oxígeno que la necesaria estequiométricamente (Tchobanoglous, 1993). Actualmente hay instaladas o en construcción más de 100 plantas alrededor del mundo. Este proceso tiene varias ventajas por sobre los métodos tradicionales de combustión de DSM (por ejemplo, la incineración), (Klein, 2002).

La gasificación es un proceso termoquímico que genera como producto gas combustible. En el caso de los DSM, se aplica para reducir el volumen de los mismos y recuperar energía a partir de éstos. El proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un combustible rico en gas con altos contenidos de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera en condiciones de oxígeno adicional. (Tchobanoglous, 1993)

En los procesos de gasificación se llevan a cabo dos etapas para la producción de gas combustible aprovechable. En el primer paso reaccionan los componentes volátiles del combustible a temperaturas por debajo de los 600 °C. El subproducto de la pirólisis que no volatiliza se denomina combustible carbonoso, conformado por carbón activado y ceniza. En el segundo paso, el carbón residual posterior a la pirólisis se hace reaccionar ya sea con vapor, con aire, con hidrógeno o con oxígeno puro. La gasificación con aire tiene como producto un gas rico en nitrógeno y con bajo poder calorífico; cuando se utiliza oxígeno puro resulta en una mezcla con alta pureza rica en monóxido de carbono e hidrógeno y con una mínima concentración de nitrógeno; cuando se utiliza vapor durante la gasificación, el producto que se obtiene es un gas (*gas de síntesis*), rico en hidrógeno y en dióxido de carbono. Regularmente, la reacción exotérmica entre el carbón y el oxígeno genera el calor necesario para llevar a cabo las reacciones de pirólisis y gasificación del carbón residual (EREN, 2002).

Las reacciones básicas en la gasificación son (Krigmont, 1999):

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$  - 393 kJ/mol (exotérmica)
- $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$  + 131 kJ/mol (endotérmica)
- $C + CO_2 \rightarrow 2CO$  + 172 kJ/mol (endotérmica)
- $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$  - 74 kJ/mol (exotérmica)
- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$  - 41 kJ/mol (exotérmica)
- $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$  - 205 kJ/mol (exotérmica)

Todas las reacciones expresadas son reversibles, sus velocidades dependen de la temperatura, de la presión y de la concentración de oxígeno en el reactor. El calor necesario para mantener el proceso se obtiene de las reacciones exotérmicas, mientras que los componentes de la combustión son generados principalmente por las reacciones endotérmicas (Tchobanoglous, 1993).

### **Tipos de gasificadores**

Existen 3 tipos básicos de gasificadores: 1. Lecho fijo vertical, (a) flujo descendente y (b) flujo ascendente; 2. Lecho fijo horizontal; 3. Lecho fluidizado. A continuación se describen los principios operacionales básicos de cada uno:

#### *1. Lecho fijo vertical*

Como se muestra en la Figura 2.5, el flujo del combustible a través del gasificador se produce por gravedad (flujo descendente), con el aire y el combustible fluyendo conjuntamente a través del reactor. Los productos finales del proceso son principalmente: gas de bajo poder calorífico y coque.

El gasificador de lecho fijo vertical tiene algunas ventajas sobre los otros tipos de gasificadores, incluyendo su simplicidad y los costos de inversión relativamente bajos. Sin embargo, este tipo de reactor es más sensible a las características mecánicas de los desechos (combustible), ya que deben ser homogéneos.

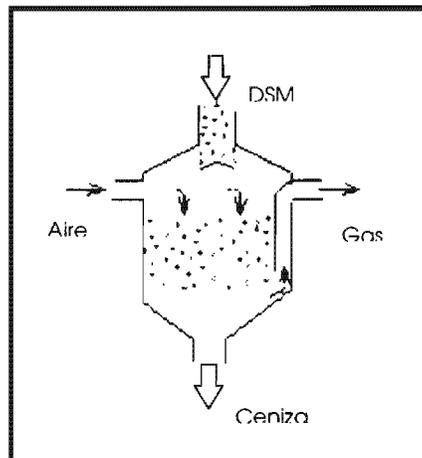


Figura 2.5. Gasificador de lecho fijo, corriente descendente (Fuente: Scottish Agricultural, 2002)

Es posible también operar un reactor de lecho fijo vertical con un flujo contracorriente (flujo ascendente), con el aire y el gas subiendo a través del reactor (Figura 2.6).

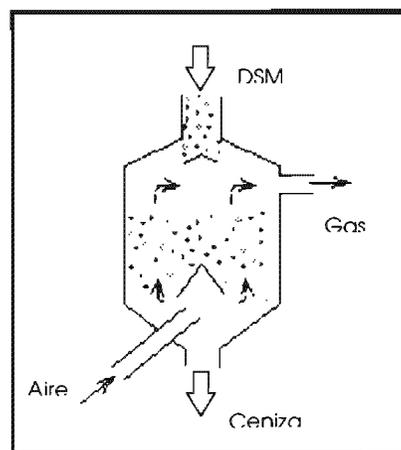


Figura 2.6. Gasificador de lecho fijo, corriente ascendente (Fuente: Scottish Agricultural, 2002)

## 2. Lecho fijo horizontal

El gasificador de lecho fijo horizontal se ha convertido en el más disponible comercialmente. Se conoce como *incinerador de aire restringido* (incinerador), *incinerador de aire controlado* o *incinerador pirolítico*. Está formado por dos componentes importantes: una cámara de combustión primaria y una cámara de combustión secundaria. En la cámara de combustión primaria, los desechos se gasifican mediante una combustión parcial en condiciones sub-estequiométricas, produciéndose un gas de bajo poder calorífico que después fluye a la cámara de combustión secundaria, donde se quema con oxígeno adicional. La combustión secundaria produce gases a altas temperaturas (650 a 870 °C) de combustión completa (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) que se pueden utilizar para producir vapor o agua caliente en una caldera adjunta de calor residual. (Tchobanoglous, 1993).

## 3. Lecho fluidizado

La gasificación en lecho fluidizado se basa en el principio tecnológico de la incineración, tomando en cuenta que la operación se realiza en forma sub-estequiométrica. Básicamente consiste de un cilindro vertical de acero (Figura 2.7), normalmente forrado con refractario; un lecho de arena, una placa rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire. Cuando se fuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se *fluidiza* y se expande hasta dos veces su volumen en reposo. Existen diferentes variantes a este proceso, como lechos fluidizados duales, en los cuáles se utiliza uno para el combustible y otro para la combustión del coque, utilizando arena como medio de transferencia de calor entre los dos lechos y produciendo un gas de poder calorífico medio

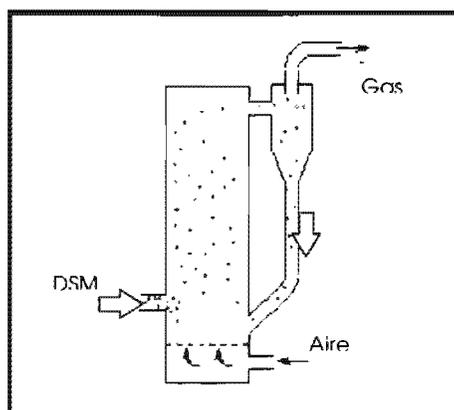


Figura 2.7. Gasificador de lecho fluidizado (Fuente: Scottish Agricultural, 2002)

### 2.2.2. Pirólisis

Debido a que la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables, se pueden romper mediante un calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, mediante la combinación de desintegración térmica y de reacciones de condensación en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. Los procesos basados en este principio se denominan de *pirólisis* (Tchobanoglous, 1993).

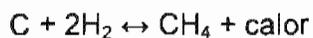
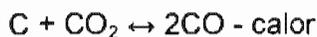
La pirólisis es un proceso térmico que se realiza en ausencia total de oxígeno, otros términos utilizados son para referirse ésta son: *termólisis* y *destilación destructiva*. Cabe señalar que algunos sistemas denominados de pirólisis, son en realidad de gasificación, de esta forma se usan los sistemas de pirólisis y gasificación para convertir los DSM en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos, así la diferencia principal entre los dos sistemas consiste en que los procesos de pirólisis utilizan una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno; mientras que los sistemas de gasificación se sostienen sin aportes externos y usan aire u oxígeno para la combustión parcial de los desechos (Tchobanoglous, 1993).

Los productos de la pirólisis de los DSM son gases, líquidos y carbón. Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la pirólisis son:

Reacción principal:



Reacciones secundarias:



Las tres fracciones de componentes más importantes producidas mediante pirólisis son las siguientes (*idem*):

1. Una corriente de gas (gas de síntesis), que contiene principalmente metano, hidrógeno, monóxido de carbono y diversos gases, de acuerdo con las características del material que es pirolizado,
2. Una fracción líquida que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con un procesamiento adicional, la fracción líquida puede utilizarse como aceite combustible sintético sustituyendo al aceite combustible convencional del número 6,
3. Coque inferior, que consiste en carbono casi puro más que cualquier material inerte originalmente presente en los desechos sólidos.

La Oficina de Minas de los EEUA, reporta resultados de la investigación realizada durante la pirólisis de DSM mezclados y DSM seleccionados (combustible derivado de desechos, CDD). Los resultados muestran que el residuo sólido obtenido del CDD (principalmente desechos plásticos), tiene un mayor poder calorífico que el de los DSM mezclados. Las pruebas realizadas muestran que los productos sólidos se pueden compactar mediante la adición de ceniza y ser usados como combustible sólido (Leidner J, 1981).

Los mayores constituyentes de la fracción de gas producido son: metano, hidrógeno, monóxido de carbono y etano. La pirólisis a baja temperatura. La pirolisis a baja temperatura (750°C), produce gas con un valor calorífico más alto, la pirolisis a alta temperatura (900°C), debido a su mayor producción, da lugar a fracciones gaseosas con un contenido en energía total más alto por tonelada de desechos. Asimismo, el poder calorífico del gas se puede aumentar si se remueve el dióxido de carbono. Más adelante se describen los parámetros básicos de operación del proceso de pirólisis.

La fracción líquida de los productos de la pirólisis consiste en alquitrán, aceites ligeros y licor. El licor obtenido de la pirólisis del CDD, contiene aproximadamente un 94 a 100% de agua y mínimas cantidades de compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos compuestos, debido a su baja concentración no tienen valor comercial, sin embargo, junto con el agua, pueden representar un problema de disposición.

#### *Parámetros de operación para los procesos de pirólisis*

Los productos específicos de la pirólisis están influenciados por los siguientes parámetros:

- Tiempo de residencia
- Temperatura
- Tamaño de partícula
- Atmósfera de reacción (oxígeno, aire, vapor, libre de oxígeno)

En la Figura 2.8 se presentan los parámetros básicos de operación que influyen en las características de los productos y que se deben controlar durante el proceso de pirólisis (Leidner, 1981).

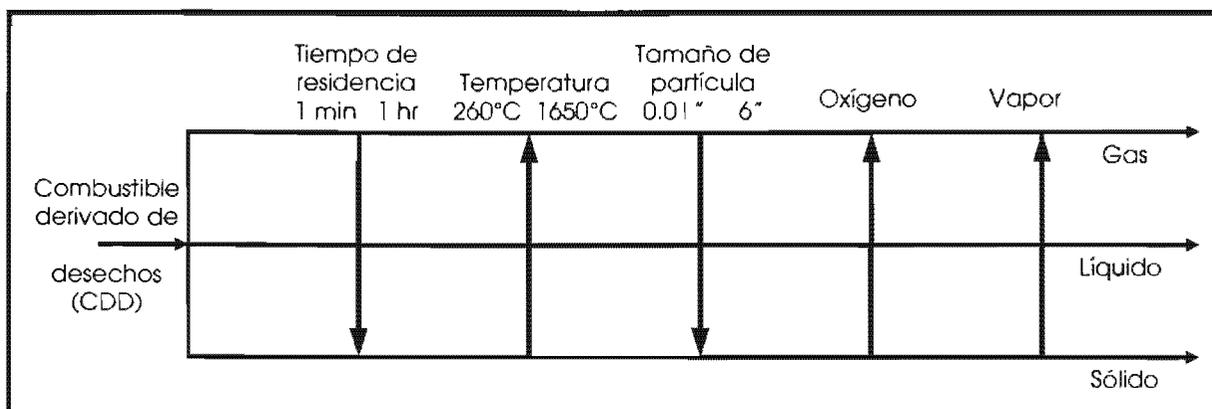


Figura 2.8. Parámetros de operación que influyen en los productos del proceso de pirólisis (Leidner, 1981)

Por ejemplo, el incremento en la temperatura de proceso durante la pirólisis, tiene el siguiente efecto (ver Figura 2.8):

- El residuo sólido decrece con el incremento de la temperatura debido al aumento en la conversión de sólidos a gases,
- La cantidad de agua disminuye con el incremento de la temperatura debido a las reacciones del metano y monóxido de carbono,
- La cantidad de aceites ligeros condensados decrece debido a las reacciones de "cracking", que producen compuestos de menor peso molecular,
- La producción de gas y poder calorífico aumentan con la temperatura.

Otro parámetro importante que influye en las características de los productos generados mediante pirólisis es la preparación de los desechos. Para obtener un mayor control de otros parámetros tales como: temperatura, tiempo de residencia y velocidades de calentamiento,

es necesario reducir el tamaño de partícula de los desechos, de esta forma se aumenta la superficie de contacto de los mismos.

Una variante más de los parámetros de proceso de pirólisis es que para una temperatura de reacción y tiempo de residencia dados y tamaños de partícula menores, resultarán en velocidades de reacción más rápidas, reducción de las cantidades de sólidos y líquidos producidos y el incremento en la generación de gas.

Así mismo el secado de los desechos antes de entrar al proceso es una práctica común, ya que reduce la cantidad de calor que ha de alimentarse al pirolizador, el tiempo de calentamiento y la cantidad de líquidos producidos.

Como se ha dicho, la pirólisis a diferencia de la incineración, es una reacción endotérmica y utiliza calor para destilar los componentes volátiles y por lo tanto requiere de la aplicación de calor para llevarse a cabo. Hay dos formas en que esto se puede realizar:

1. Método directo. Combustión parcial de los desechos o CDD donde el oxígeno o aire es alimentado al reactor de pirólisis. Cuando se alimenta oxígeno el proceso se vuelve más costoso, sin embargo, el gas producido tiene un mayor poder calorífico y se evita la formación de compuestos  $\text{NO}_x$ . El vapor puede ser utilizado para reducir la cantidad de residuos sólidos (mediante la reacción agua-carbón).
2. Método indirecto. Separación física de la cámara de combustión y de la cámara de pirólisis, en este caso se utiliza un intercambiador de calor para alimentar al reactor de pirólisis.

En el Cuadro 2.12 se presentan los diferentes tipos de reactores de pirólisis y sus características en cuanto a la simplicidad de su operación y la generación de calor mediante los procesos de calentamiento directo e indirecto. El principio de proceso de cada reactor utilizado en la pirólisis es igual a los empleados para la gasificación.

Cuadro 2.12. Características de cada tipo de reactor utilizado en la pirólisis (Leidner, 1981)

Tipo de reactor de pirólisis	Calentamiento directo		Calentamiento indirecto			
	Simplicidad en la operación	Alta producción de calor	Transferencia mediante pared		Medio circundante	
			Simplicidad en la operación	Alta producción de calor	Simplicidad en la operación	Alta producción de calor
Eje vertical	+	/	+	-	-	+
Eje horizontal	ninguno	ninguno	-	-	-	+
Horno rotatorio	+	/	+	-	-	+
Lecho fluidizado	-	+	ninguno	ninguno	-	+

Notas: el signo (+) indica un aumento; el signo (-) indica un detrimento; (ninguno) indica que ese tipo de proceso ha no reportado esas características; (/) indica que no es una característica evaluable como cualidad o detrimento

Las principales ventajas de la pirólisis sobre otras tecnologías térmicas de valorización de DSM son (Kumar, 2000; IEA-CADDET, 1998):

- La mayor parte de los DSM, se pueden convertir en energía térmica aprovechable
- El volumen de los desechos se puede reducir en un 90% o más
- El proceso de pirólisis es cerrado, debido a esto no conlleva contaminación del aire
- Debido a que este proceso no es contaminante y requiere un espacio pequeño para su instalación, se puede instalar dentro de las ciudades, lo que resulta en la reducción de los costos de transporte de los DSM
- Hay una generación neta de energía
- La energía producida puede estar en formas como gas, aceite y ceniza
- El proceso se puede modificar para producir ciertos tipos de combustibles, ya que es selectivo
- Debido a que se lleva a cabo una oxidación mínima de los desechos, los componentes metálicos se pueden recuperar una vez realizada la pirólisis

### 2.2.3. Aplicación de la Gasificación y la Pirólisis<sup>25</sup>

En el Cuadro 2.13 se presentan las principales tecnologías y proveedores de los procesos de gasificación y pirólisis de DSM, más adelante se presenta la descripción de algunas de estas tecnologías y de las cuales que se tuvo acceso a información de su proceso.

**Cuadro 2.13 Principales tecnologías basadas en la pirólisis y la gasificación de DSM (Juniper, 2001)**

Proveedor/Nombre del proceso/País	Tipo de proceso	Productos principales	Estado de la tecnología
Brightstar Env./SWERF/Australia	Pirólisis	Gas de síntesis	Demostración
Compact Power/ Reino Unido	Pirólisis + Gasificación + Combustión	Gas	Demostración
Ebara/TwinRec/Japón	Gasificación + Fundición + combustión	Gas	Comercial
Enerkem/Biosyn/Canadá	Gasificación	Gas de síntesis	Semi-comercial
Foster Wheeler/Finlandia	Gasificación	Gas de síntesis	Comercial
Graveson/GEM/Reino U.	Gasificación	Gas de síntesis	Piloto
JND/Reino Unido	Gasificación	Gas de síntesis	Diseño
Lurgi/BGK/Alemania	Gasificación	Gas de síntesis	Demostración
Organic Power/Noruega	Gasificación+combustión	Gas	Semi comercial
PKA/Alemania	Pirólisis + Gasificación + Fundición	Gas de síntesis	Comercial
RGR Ambiente/Italia	Gasificación + Fundición	Gas de síntesis	Piloto
Serpac/Pyrofiarm/Bélgica	Pirólisis + Gasificación + Combustión	Gas	Demostración
Texaco	Gasificación	Gas de síntesis	Comercial (desechos de refinería), Demostración (desechos plásticos)
Thermoselect/Suiza	Pirólisis + Gasificación	Gas de síntesis	Semi-comercial
Thide/Eddith/Francia	Gasificación+combustión	Gas	Demostración
TPS/Suecia	Gasificación	Gas de síntesis	Semi-comercial
WasteGen/Pyropleq/Reino Unido	Gasificación	Gas de síntesis	Comercial

<sup>25</sup> Fuentes: Fichtner-ESTET, 2004; Juniper, 2001; IEA-CADDET, 1998.

Los procesos descritos a continuación son el resultado de la búsqueda *en línea* en la *World Wide Web* (WWW) de empresas que utilizan la gasificación y la pirólisis como tecnologías integradas a sistemas integrales de valorización de DSM. La investigación tiene como fundamento la información disponible de: Energy International Agency (EIA); Center for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET); Juniper Consultants Services Ltd., y Environment Agency del Reino Unido. En todos los casos se describe el proceso de acuerdo con la información disponible de cada proceso patentado.

## BRIGHTSTAR ENVIRONMENTAL – SWERF®

### Proceso

El proceso de la empresa Brightstar Environmental se basa en la aplicación de la pirólisis para el tratamiento de CDD. Tiene patentada la tecnología Solid Waste & Energy Recycling Facility® (SWERF®)

Su tecnología se consta de tres componentes integrados: (1) el pre-tratamiento y la separación de materiales reciclables, (2) la conversión térmica y (3) la producción de energía eléctrica.

Las etapas principales de su proceso son (Figura 2.9):

- Recuperación de los subproductos reciclables en la planta de separación para obtener combustible derivado de desechos (CDD)
- Esterilización de los desechos en autoclave a una temperatura entre 130 a 150°C, mediante presión y calor
- Almacenamiento del CDD
- Pirólisis del CDD para producir gas de síntesis y combustible líquido
- Enfriamiento y limpieza del gas de síntesis
- Generación de energía eléctrica
- La ceniza residual contiene de 35 a 40% de carbón, que puede ser llevada a disposición en relleno

- El combustible líquido se puede utilizar para la generación de vapor y el calentamiento del pirolizador

### Observaciones

- Existe una planta de demostración en Australia que fue puesta en operación desde 2001 de forma intermitente, actualmente procesa 25,000 ton/año, no obstante que su capacidad de diseño es para 1'000,000 ton/año
- Los gases que se emplean en la generación de energía no cumplen con la normatividad en cuanto a la emisión de gases provenientes de procesos de incineración (WID<sup>26</sup>). Sin embargo, esta normatividad no aplica en Australia.
- Como parámetro internacional, Brightstar Environmental, está aplicando medidas para el tratamiento de los gases exhaustos y cumplir con los límites establecidos con las disposiciones de incineración de desechos del Reino Unido, sin embargo hasta la fecha de revisión de su sitio en la WWW, esto no ha sido demostrado por la empresa.
- La comercialización de la tecnología SWREF®, en el Reino Unido está en proceso.

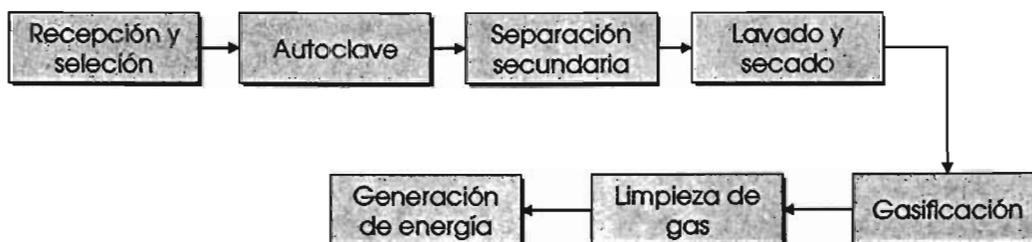


Figura 2.9. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Brightstar Environmental-SWERF®

### Fuente

[www.brightstarencvironmental.com](http://www.brightstarencvironmental.com) (actualizado en mayo de 2005)

<sup>26</sup> WID, Waste Incineration Directive. Es la Directiva Europea sobre Incineración (2000/76/EC). La gasificación y la pirólisis también están reguladas por la Directiva sobre incineración de desechos.

## COMPACT POWER

### Proceso

El proceso de Compact Power, se basa en la aplicación de la pirólisis, gasificación y combustión de los DSM en 3 etapas para la generación de energía eléctrica a partir de la producción de gas combustible. Las etapas básicas del proceso son (Figura 2.10):

- Planta de recuperación y selección de subproductos
- Pirólisis a una temperatura de 800°C, en un sistema basado en el calentamiento de 2 tubos externos a la cámara de pirólisis. Cada tubo está diseñado para procesar hasta media tonelada de desechos por hora, aproximadamente 9,000 ton/año
- Gasificación de los residuos provenientes de la pirólisis (principalmente cenizas), mediante aire y vapor, para producir hidrógeno y monóxido de carbono
- Combustión del gas de síntesis a una temperatura mínima de 1,250°C y en un tiempo de reacción no menor a 2 segundos, con el fin de asegurar la emisión de gases y partículas libres de elementos y/o compuestos tóxicos orgánicos (dioxinas y furanos, entre otros). El combustible y el aire se alimentan a la cámara de combustión para formar un flujo constante
- La generación de energía se lleva a cabo mediante turbinas
- La limpieza del gas se realiza mediante el uso de filtros de mangas y la inyección de bicarbonato de sodio y otros reductores catalíticos con amoníaco para la reducción de NO<sub>x</sub>

### Observaciones

- Se encuentra operando comercialmente una planta en la ciudad de Avonmouth Bristol, Reino Unido, sin embargo, debido a que es de pequeña escala, se utiliza solamente para el procesamiento de residuos biológico-infecciosos

- En un inicio, la planta fue construida para el tratamiento de DSM antes de tratar residuos biológico-infecciosos
- La tecnología por módulos que ofrece no es capaz de beneficiar a las economías de gran escala, sin embargo esta opción modular reduce los riesgos en la inversión.
- Esta tecnología tiene su mercado en el tratamiento de pequeñas cantidades de CDD.

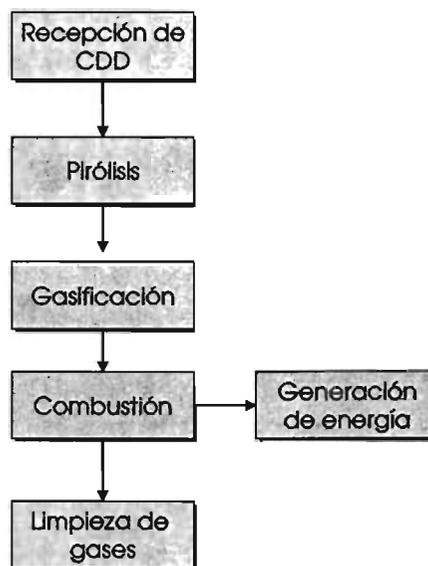


Figura 2.10. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Compact Power

#### Fuente

<http://www.compactpower.co.uk/index.html> (actualizado en mayo, 2005)

## ENERGOS TECHNOLOGY

### Proceso

El proceso de Energos Technology, se fundamenta en la gasificación de los DSM, sus principales etapas son (Figura 2.11):

- Trituración de los desechos con el propósito de aumentar el área de contacto-reacción
- Gasificación en módulos con capacidad para procesar aproximadamente 35,000 ton/año
- Oxidación a altas temperaturas (incineración)
- Generación de vapor en caldera
- La limpieza de los gases generados se lleva a cabo mediante filtros con cal y carbón, principalmente.

### Observaciones

- Actualmente están en operación cinco plantas en Noruega y una en Alemania (no se especifica si es a nivel comercial o piloto)
- La oficina de comercialización de gas y electricidad del Reino Unido ha extendido el Certificado de Obligación Renovable a la tecnología de gasificación desarrollada por Energos, misma que se extiende a las empresas que cumplen con los requerimientos para garantizar una generación de energía eficiente y ambientalmente amable.



Figura 2.11. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Energos Technology

### Fuentes

[http://www.energ.co.uk/EFW\\_european\\_diagram.pdf](http://www.energ.co.uk/EFW_european_diagram.pdf) (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.energ.co.uk> (actualizado en mayo de 2005)

---

## ENERKEM/NOVERA

### Proceso

El proceso patentado por Enerkem/Novera, se basa en la gasificación del CDD, para la generación de energía, el proceso consta de (Figura 2.12):

- Recepción de los DSM, peletización y almacenamiento del CDD
- Gasificación en cama de lecho fluidizado con sílica-alúmina como material de contacto. La cantidad de aire u oxígeno alimentado al lecho fluidizado representa aproximadamente un 30% de la cantidad requerida estequiométricamente para la completa combustión de los desechos
- Remoción y disposición de las cenizas y partículas del gas de síntesis producido, mediante filtros de ciclón
- Limpieza y enfriamiento del gas exhausto mediante depuradores tipo venturi, precipitador electrostático y secador para producir un gas de síntesis limpio que es empleado en los motores de gas.

### Observaciones

- La tecnología fue desarrollada por Enerkem (Enerkem Technologies) y comercializada en Europa por Novera (Novera Energy Pty Ltd)
- La tecnología es aplicada a plásticos con alto poder calorífico o CDD
- Actualmente Novera está ofreciendo el proceso de gasificación completo, es decir, la construcción, operación y mantenimiento es bajo su administración.

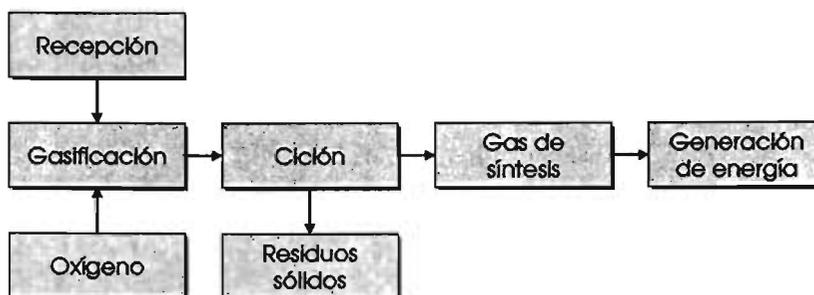


Figura 2.12. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Novera

### Fuentes

<http://www.enerkem.com> (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.noveraenergy.com/> (actualizado en mayo de 2005)

## FERCO

El proceso de FERCO Enterprises Inc., utiliza la gasificación para generar energía eléctrica mediante su proceso patentado "SilvaGas Process™". Actualmente el proceso se encuentra en planta piloto-demostración en la ciudad de Vermont, EEUA. En la Figura 2.13 se presenta el diagrama de bloques del proceso desarrollado por FERCO Enterprises Inc.

### Proceso

- Recepción y secado del CDD
- Gasificación en cama de lecho fluidizado
- El vapor sobrecalentado se alimenta como medio de transporte para el gas de síntesis lejos de las zonas de reacción. La gasificación se lleva a cabo en uno de dos lechos fluidizados con el fin de proporcionar calor a la sílice transportada del generador de gas, esta arena se recicla dentro del generador de gas para proporcionar el calor suficiente para que las reacciones químicas de termólisis se lleven a cabo.
- El gas de síntesis se utiliza directamente en la planta de demostración de Ferco Enterprises Inc., actualmente se está analizando el uso de una turbina de gas de ciclo combinado para la generación de energía. Se han realizado algunas pruebas en la planta piloto para usar el gas de síntesis en una turbina con capacidad para generar 200 kW

### Observaciones

- En Vermont, EEUA, se tiene instalada una planta de demostración, la cual consiste en un gasificador que procesa biomasa y el gas de síntesis producido se lleva a una planta de generación eléctrica
- Los DSM no han sido aún llevados al proceso y solamente se han hecho demostraciones con CDD, las cuales han sido en planta piloto
- En el caso de que el humo derivado de la combustión del carbón se utilizara para la generación de energía la planta no calificaría para los ROCs (Renewable Obligation

Certificates en el Reino Unido), ya que no emplea fuentes renovables para la generación de energía.

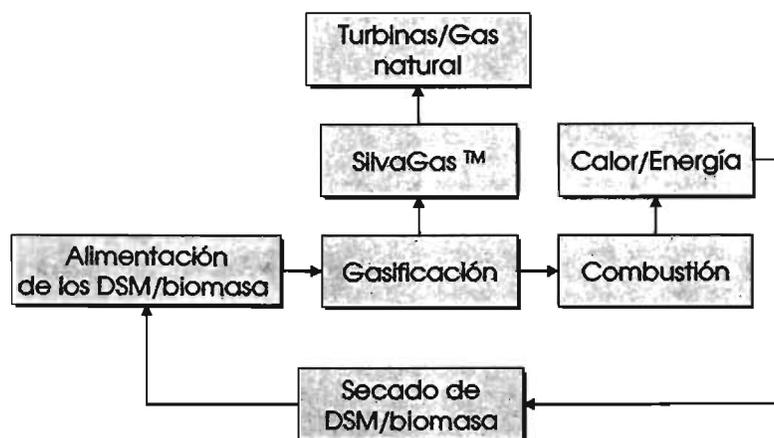


Figura 2.13. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por FERCO Enterprises Inc.

### Fuente

<http://www.fercoenterprises.com> (actualizado en mayo de 2005)

---

## FOSTER WHEELER LTD.

### Proceso

El proceso desarrollado por Foster Wheeler Ltd., se basa en la gasificación y combustión de biomasa (bagazo, principalmente), Figura 2.14:

- Gasificación de CDD en una cama de lecho fluidizado con circulación continua a presión atmosférica
- Uso de gas de síntesis en una estación eléctrica, en un proceso industrial o caldera

### Observaciones

- La principal referencia del proceso desarrollado por Foster Wheeler Ltd., se encuentra en la planta de demostración ubicada en Lathi, Finlandia<sup>27</sup>, en donde su proceso utiliza como materia prima CDD, compuesto principalmente por plástico, cartón, papel y madera
- El gas de síntesis es procesado en una estación eléctrica
- Existen otros cuatro gasificadores que utilizan cortezas y madera como principal materia prima y que fueron desarrollados entre 1983 y 1986. Las capacidades de estos gasificadores están entre los 15 MWth y los 35 MWth, el gas de síntesis producido se usa principalmente como combustible en hornos de cal o molinos de la industria del papel
- En el año 2000, la planta de Corenso United Ltd, en Finlandia procesó desechos plásticos para producir gas de síntesis para alimentar calderas, la producción de energía fue de 40 MW
- En el otoño de 2001, se puso en operación un gasificador para la generación de energía y la recuperación de aluminio en Varkaus, Finlandia (FUENTE. Gasificación EIA)

---

<sup>27</sup> Nieminen, J., "Biomass CFB Gasifier Connected to a 350 MWth Steam Boiler Fired with Coal and Natural gas-thermie Demonstration project in Lahti", Finland, November, 1998.

- Esta tecnología evita las dificultades técnicas por pérdidas de eficiencia en la generación de energía asociadas a la limpieza y enfriamiento del gas de síntesis, así como a su uso en motores y turbinas de gas
- Actualmente Foster Wheeler Ltd., tiene la meta de utilizar su gasificador para procesar CDD y producir gas de síntesis que sería utilizado en la generación de energía eléctrica.
- El proceso de Foster Wheeler Ltd., está en una etapa más avanzada de demostración y aplicación que la mayoría de los sistemas de gasificación y de pirolisis

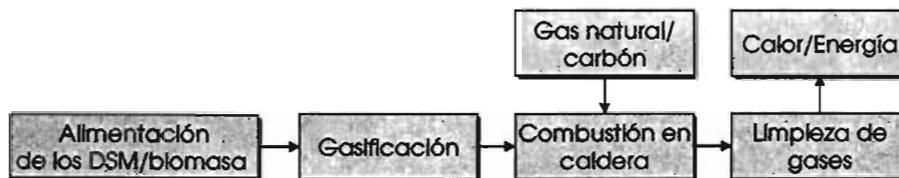


Figura 2.14. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Foster Wheeler Ltd

## Fuentes

<http://www.fwc.com> (actualizado en mayo de 2005)

[http://www.fwc.com/publications/tech\\_papers/powgen/bagasse3.cfm](http://www.fwc.com/publications/tech_papers/powgen/bagasse3.cfm) (actualizado en mayo de 2005)

## GEM (GRAVESON ENERGY MANAGEMENT)

### Proceso

El proceso desarrollado por Graveson Energy Management, Reino Unido, se basa en la pirólisis rápida<sup>28</sup> del CDD para producir gas de síntesis utilizado en la generación de energía eléctrica o para su uso como gas natural en calderas. El proceso consta de los siguientes pasos (Figura 2.15):

- Reciclado de materiales con valor económico
- Pre-tratamiento del CDD, mediante su trituración
- Secado del CDD con el fin de obtener una humedad de aproximada del 5 al 8%
- Alimentación continua del combustible al pirolizador que es calentado externamente
- Filtrado de los gases calientes
- Enfriamiento del gas de síntesis en un intercambiador de calor que es atomizado con aceite mineral refrigerante
- Compresión del gas de síntesis una vez enfriado
- Una vez que pasa la planta de pruebas el gas de síntesis es expandido. Durante las pruebas de funcionamiento del proceso se colocó un motor de gas por algunas semanas, sin embargo no se tienen datos sobre su operación.

### Observaciones

- La planta de prueba en Bridgend, Reino Unido, no está en operación actualmente
- Los análisis realizados al gas exhausto del motor de prueba muestran altos niveles de CO y de NO<sub>x</sub>, sin embargo estos resultados fueron dispensados por la Agencia de Energía del Reino Unido<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> La pirólisis rápida se refiere a un tiempo de residencia suficiente (fracción de segundos) para llevar a cabo la reacción de rompimiento de los enlaces químicos a temperaturas moderadas, con una tasa alta de transferencia de calor a las partículas de biomasa y en un tiempo de residencia corto del vapor en la zona de reacción.

<sup>29</sup> Fuente: <http://www.environment-agency.gov.uk/wtd/679004/679021/679047/946096/?lang= e> (mayo, 2005)

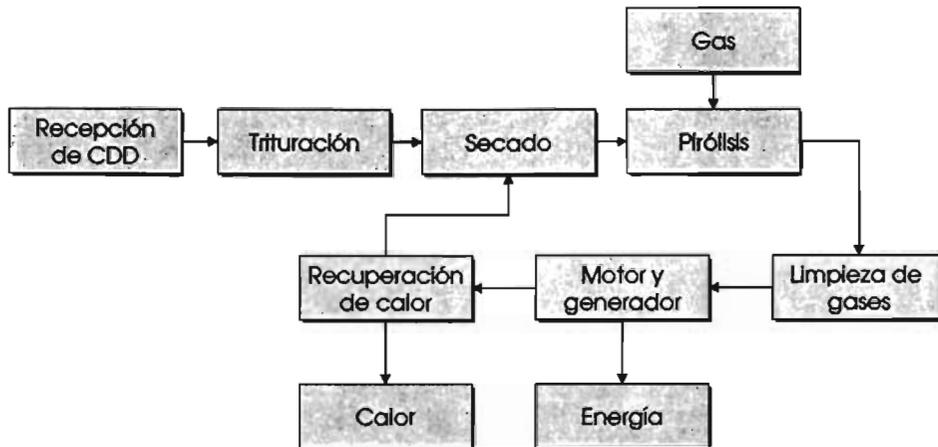


Figura 2.15. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Graveson Energy Management

#### Fuentes

<http://www.gemcanadawaste.com/> (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.gem-ltd.co.uk/> (actualizado en mayo de 2005)

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## IET ENERGY / ENTECH

El proceso manufacturado por Entech Environmental® se denomina Renewable Energy System™, el cual se fundamenta en la gasificación de CDD y biomasa para generar energía eléctrica (Figuras 2.16 y 2.17).

### Proceso

- Se necesita mínimo o nulo pre-tratamiento de los DSM recibidos, sin embargo, se realiza el reciclado de subproductos con valor económico
- Alimentación continua de los desechos al gasificador
- Combustión del gas de síntesis en reactor con recirculación-recuperación de gas y sistema de reducción no catalítica<sup>30</sup> para la reducción de NO<sub>x</sub> en las emisiones a la atmósfera
- Generación de energía mediante calderas o turbinas de vapor
- Sistema de limpieza de gases de combustión, que consiste en filtro de bolsas con la adición de reactivos para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, y torre empacada para el control de emisiones ácidas. IET/Entech® ofrecen el cumplimiento de la directiva europea para la incineración de desechos<sup>31</sup>
- Recuperación de metales ferrosos, no ferrosos y vidrio de los residuos procedentes del gasificador.

### Observaciones

- El proceso desarrollado por Entech es comercializado por IET Energy en el Reino Unido

<sup>30</sup> Técnica para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> en las emisiones a la atmósfera mediante la adición de un agente reductor, tal como amoníaco o urea en la corriente caliente del humo sin el empleo de catalizador.

<sup>31</sup> Directiva 2000/76/EC sobre la incineración de desechos publicada el 28 de diciembre de 2000 en the Official Journal of the European Communities (L332, p.91).

- Hay 145 referencias de plantas que procesan desechos, de las cuales 8 plantas procesan CDD. La mayor planta construida tiene una capacidad para procesar aproximadamente 25,000 ton/año



Figura 2.16. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por ENTECH Renewable Energy System

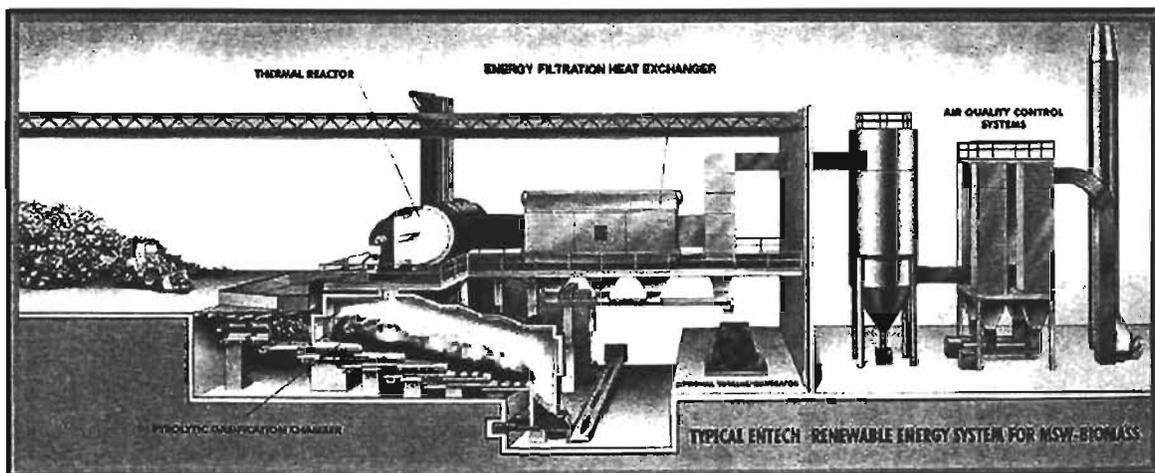


Figura 2.17. Diagrama del proceso desarrollado por ENTECH Renewable Energy System

## Fuentes

<http://www.ietenergy.com/> (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.ntench-environmental.com/> (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.entech.net.au/ws2/process.htm> (actualizado en mayo de 2005)

## LURGI

El proceso Lurgi está basado en la tecnología de gasificación de lecho fluidizado patentada con el mismo nombre en 1887.

### Proceso

- En el proceso se utilizan más de 19 tipos de CDD, entre ellos plásticos.
- Los sistemas de alimentación al proceso pueden manejar un máximo de 4 combustibles diferentes.
- La gasificación se lleva a cabo en una cámara de lecho fluidizado
- La disposición de cenizas se realiza en una planta de cemento
- El gas de síntesis se utiliza en el proceso de calcinación en una planta de cemento

### Observaciones

- Se tiene la referencia de una planta que produce gas de síntesis y carbón para su uso en horno de cemento mediante la gasificación de lecho fluidizado de CDD (IEA Bioenergy-GasNet, 2002)
- Una referencia adicional se tiene del gasificador de las empresas British Gas y Lurgi, que procesan una mezcla de carbón y desechos para producir gas de síntesis para su uso como combustible.
- No obstante de los años de experiencia en estas plantas, se retiraron recientemente del mercado de la gasificación y pirólisis de desechos.

No está disponible la descripción o diagrama de bloques de su proceso.

### Fuentes

<http://www.lurgi.de/english/nbsp/index.html> (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.netl.doe.gov/coal/gasification/description/gasifiers.html#Lurgi>

## MITSUI BABCOCK

El proceso de gasificación de la empresa Mitsui Babcock Engineering Ltd. está basado en la tecnología Mitsui R21®. En la Figura 2.18 se presenta el diagrama de bloques de este proceso basado en la pirólisis del CDD.

### Proceso

- Alimentación de los desechos triturados a un horno rotatorio que es indirectamente calentado. La temperatura de reacción es menor de 450°C en un horno rotatorio que es indirectamente calentado
- Recuperación de metales a partir de las cenizas residuales
- Combustión del gas de síntesis y carbón en una segunda cámara de combustión a 1300 °C, para fundir las cenizas
- Generación de energía por medio de turbinas
- Recolección de cenizas mediante filtros de bolsas
- Tratamiento de residuos previo a su envío a sitio de disposición final

### Observaciones

- La tecnología "R21", fue desarrollada originalmente por Siemens Co.
- Mitsui Babcock ha construido 2 plantas basadas en la tecnología R21 en Japón<sup>32</sup> (DTI, 2002)
- Mayor información sobre el proceso es de carácter confidencial

---

<sup>32</sup> Hay una planta en Yame Seibu en operación comercial desde abril de 2000. La segunda planta inició operaciones comerciales en abril de 2002. Mitsui tiene órdenes de entrega de 4 instalaciones más con la tecnología R21 para entregarse a más tardar en 2005.

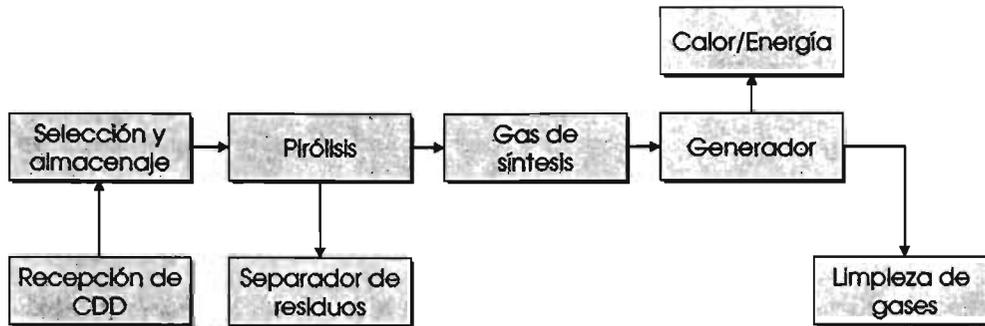


Figura 2.18. Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Mitsui Babcock Engineering Ltd.

## Fuentes

<http://www.environment->

[agency.gov.uk/wtd/679004/679021/679047/977336/?version=1&lang= e](http://www.environment-agency.gov.uk/wtd/679004/679021/679047/977336/?version=1&lang=e) (actualizado en mayo de 2005)

<http://www.dti.gov.uk/renewables/publications/pdfs/bwm00553.pdf>

<http://www.mitsuibabcock.com/live/cme0.htm> (actualizado en mayo de 2005)

---

## TECHTRADE/WASTEGEN

El proceso desarrollado por Techtrade y Wastgen (Figura 2.19)

### Proceso

- Pirólisis en horno rotatorio con la adición de cal
- Combustión del gas de síntesis
- Generación de electricidad por medio de ciclo de vapor
- Reducción selectiva no catalítica para el control de emisiones de NO<sub>x</sub>
- Limpieza de los gases de combustión por medio de filtros con bicarbonato de sodio e inclusión de carbón activado

### Observaciones

- La tecnología de Techtrade se comercializa por la empresa Wastegen en el Reino Unido
- Hay referencia de una planta en operación en Burgau, Alemania, desde 1984
- Los residuos contienen un 26% de carbón. La unidad de recuperación de carbón (basada en tecnología de hornos rotatorio o lecho fluidizado), se está analizando como una opción adicional al proceso de generación de energía.
- La eficiencia del proceso se puede aumentar si se lleva a cabo la gasificación del carbón producido
- Hay una referencia reciente de una planta en Hamm-Uentrop, Alemania, que se basa en la combustión del gas de síntesis y ceniza en una estación eléctrica

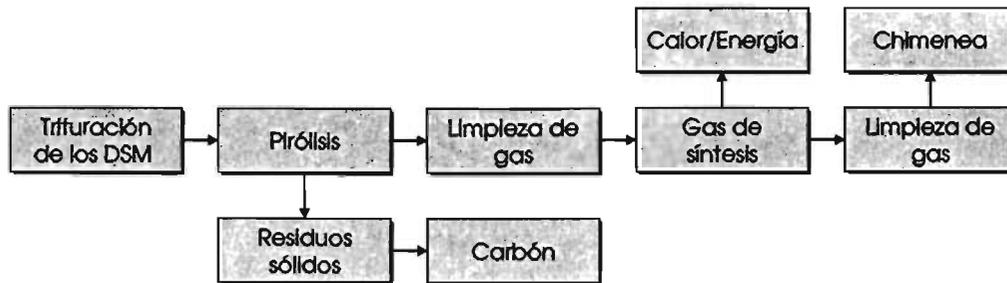


Figura 2.19 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por WasteGen Ltd.

#### Fuente

<http://www.wastegen.com> (actualizado en mayo de 2005)

## THERMOSELECT

La tecnología Thermostelect se basa en la obtención de gas de síntesis, materias minerales vitrificadas, así como metal rico en hierro y azufre sometiendo los DSM e industriales a gasificación a altas temperaturas y a fusión directa los inorgánicos. A diferencia de otros procesos térmicos no es necesario depositar o aplicar tratamiento a cenizas, escoria o polvo de filtración (Figura 2.20).

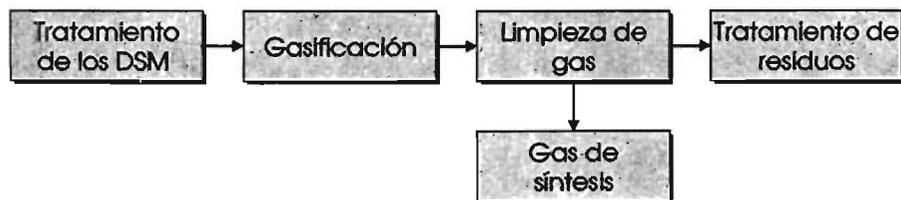
### Proceso

- Pirólisis de los desechos en tubos que son externamente calentados, la alimentación se realiza forma mecánica
- Gasificación a alta temperatura (2000°C) utilizando oxígeno
- Las altas temperaturas funden la ceniza a escoria
- Los metales se solidifican de forma separada y se separan de forma magnética
- El gas de síntesis alcanza por al menos 2 segundos una temperatura de 1100°C, para posteriormente disminuir a 90°C
- El agua condensada del proceso de enfriamiento del gas de síntesis es tratada y reutilizada como refrigerante

### Observaciones

- Hay referencias de dos plantas a nivel comercial, una en Chiba, Japón y otra en Karlsruhe, Alemania (JFE, 2004)
- El Mutsu, Japón existe la referencia de que a partir de 2003 funciona una planta que genera electricidad a partir de turbinas de vapor y motores de gas, sin embargo los datos de operación no están disponibles (Environment Agency – UK)
- La planta en Chiba, Japón procesa alrededor de 170,000 ton/año (dato de 2003), (JFE, 2004)

- La tecnología es sumamente costosa ya que emplea sistemas de control de emisiones, el costo por tonelada es de aprox. £ 114.00 libras esterlinas (\$ 2,240.00 pesos mexicanos al tipo de cambio de \$ 19.63 pesos por £ 1.00 libra (mayo de 2005))<sup>33</sup>. Thermostelect ha señalado que su planta es operativa en Japón.



Notas: En el proceso desarrollado por Thermostelect el "Tratamiento de los DSM" contempla la trituración y secado y Pirólisis de los mismos

**Figura 2.20 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por Thermostelect**

## Fuente

<http://www.thermostelect.com> (actualizado en mayo de 2005)

<sup>33</sup> En la Ciudad de México, el costo por tonelada de desechos llevados a relleno sanitario es de \$ 50.00 pesos (4.5 USD al tipo de cambio en mayo de 2005). Fuente: Manejo de residuos en el Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios-Dirección General de Servicios Urbanos, enero de 2004.

## TPS TERMISKA

El proceso se basa en la gasificación de biomasa (Figura 2.21), actualmente está una planta piloto en Suecia y se tiene la referencia de una planta en construcción en Italia, en el Reino Unido la hay una planta basada en la tecnología de TPS fuera de funcionamiento.

### Proceso

- Recepción del CDD, almacenamiento y alimentación al proceso
- Gasificación mediante lecho fluidizado
- Combustión del gas de síntesis
- Generación de energía por medio de ciclo de vapor
- Tratamiento de los gases de combustión

### Observaciones

- Existe la referencia de una planta que procesa CDD en Italia, Grève-in-Chianti, Italy
- En el Reino Unido mediante un proyecto, denominado ARBRE (ARable Biomass Renewable Energy), se procesó biomasa para la generación de energía mediante turbinas de gas de ciclo combinado<sup>34</sup>. El proyecto no pudo continuar debido a los problemas derivados de la limpieza del gas de síntesis, por lo que fue abandonado y su futuro es incierto
- En Studsvik, Suecia, hay una planta piloto con capacidad de generar 2 MW, a partir de biomasa
- No se dispone de mayor información por parte de la empresa TPS Termiska.

---

<sup>34</sup> Turbina de gas de ciclo combinado, generación de energía usando una turbina de gas que funciona conjuntamente con un ciclo del vapor. El extractor caliente de la turbina de gas se utiliza para generar el vapor para el uso en la turbina de vapor.

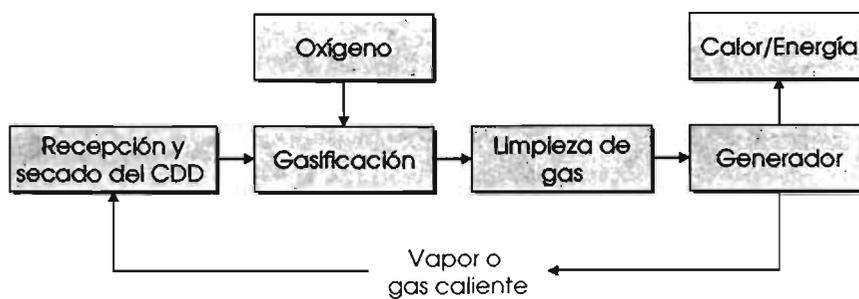


Figura 2.21 Diagrama de bloques del proceso desarrollado por TPS Termiska Processer AB © 2003

#### Fuente

[http://www.tps.se/index\\_en.htm](http://www.tps.se/index_en.htm) (actualizado en mayo de 2005)

[http://www.tps.se/gasification/tps\\_gas\\_en.htm](http://www.tps.se/gasification/tps_gas_en.htm) (actualizado en mayo de 2005)

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

En la Figura 3.1 se presenta el diagrama metodológico integrado el cual se dividió en trabajo de campo “toma de muestras y determinaciones *in situ*” y en trabajo de laboratorio “determinación de poder calorífico”.

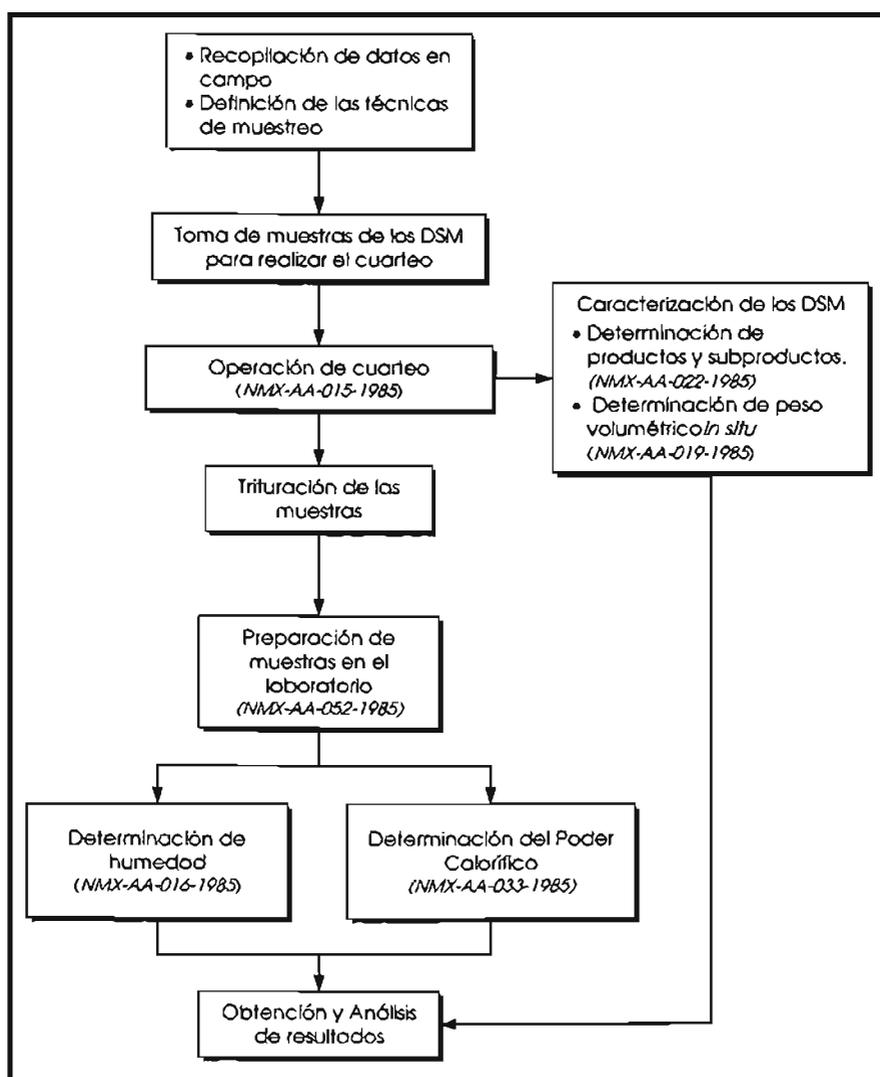


Figura 3.1. Diagrama de la metodología

### *3.1 Aspectos generales de los sitios donde se tomaron las muestras de DSM*

Las muestras de DSM a analizar se tomaron en los Sitios A, B y C, los aspectos generales y datos de generación de desechos de cada uno se presentan a continuación.

#### **3.1.1. "Sitio A", ciudad y puerto del Océano Pacífico mexicano con actividad turística y comercial**

El Sitio A, es una ciudad del Pacífico con actividad turística y comercial, tiene infraestructura hotelera y de servicios para el turismo nacional e internacional, cuenta con un puerto de gran altura donde se realizan importaciones y exportaciones a diferentes partes del mundo.

Manzanillo que se denomina el "Sitio A", se localiza en la bahía del mismo nombre en el extremo oeste del estado de Colima, entre los 103°59' a 104°44' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich y los 18°53' a 19° 18' latitud norte, con altura sobre el nivel del mar de 4 metros en el malecón de la ciudad, es el municipio más grande del estado. Sus límites son: al norte, con el Municipio de Minatitlán; al este, con Coquimatlán y Armería; al sur, con el Océano Pacífico, y al Oeste y Noroeste, con el Estado de Jalisco y el Océano Pacífico.

La población de acuerdo al XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI, 2000), realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática es de 125, 143 habitantes. La migración en el municipio es muy alta, ya que el 60% de la población se considera como flotante de esta forma, la inmigración se considera baja.

Manzanillo es actualmente la zona turística más importante del estado, se le conoce también como "La capital Mundial del Pez Vela", ya que cada año se celebra en febrero y noviembre respectivamente los Torneos Nacional e Internacional de Pesca de Pez Vela.

En el Sitio A se cuenta con un relleno sanitario para disponer los DSM, recibe principalmente desechos del municipio y entidades del gobierno federal, como la Secretaría de Marina y de la administración de portuaria.

La generación de desechos en el Sitio A en 1997, y las proyecciones para los años 2000, 2005 y 2010 se presentan en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1. Proyección de generación total y per capita para el Sitio A - Manzanillo (INE, 1997)**

Sitio Ciudad	Generación total 1997 (ton/año)	Generación <i>per capita</i> 1997 (kg/hab/día)	Generación total 2000 (ton/año)	Generación <i>per capita</i> 2000 (ton/hab/día)	Generación total 2005 (ton/año)	Generación <i>per capita</i> 2005 (kg/hab/día)	Generación total 2010 (ton/año)	Generación <i>per capita</i> 2010 (kg/hab/día)
"A" Manzanillo	50,915	1.2529	57,233	1.3154	69,432	1.4346	83,652	1.5646

### 3.1.2. "Sitio B", ciudad del sureste con actividad turística

Es una ciudad con actividad turística con infraestructura hotelera y de servicios para el turismo nacional e internacional.

La ciudad de Oaxaca de Juárez, denominada "Sitio B" se localiza en las coordenadas 17°04' de latitud norte y 96°43' de longitud oeste a 1,550 msnm en la parte central del estado de Oaxaca. Limita al norte con los municipios de San Pablo Etla; al sur con San Antonio de la Cal y Santa Cruz Xoxocotlán; al este con San Andrés Huayapam, San Agustín Yatareni y Santa Lucía del Camino; al oeste con Santa María Atzompa y San Jacinto Amilpas.

Actualmente en Oaxaca de Juárez, viven 256,848 habitantes (INEGI, 2000). Por su belleza y estado de conservación, su Centro Histórico y la zona arqueológica de Monte Albán, fueron declarados por la UNESCO en 1987 "Patrimonio Cultural de la Humanidad".

El Sitio B dispone de los DSM en un área que por sus características deficientes para el manejo de los desechos no se cataloga como relleno sanitario, en este lugar se encuentra una instalación que funcionó a principios de 1990, como planta de selección y aprovechamiento de desechos y elaboración de composta. Actualmente estas instalaciones están en desuso, debido a que con el paso del tiempo la generación de desechos superó la capacidad de procesamiento, no se pudieron comprar las refacciones necesarias para los equipos y la composta elaborada no se comercializó con éxito.

En este lugar se depositan desechos de otros municipios conurbados debido a que el servicio de disposición final que ofrece cada municipio no es suficiente como para cubrir la demanda de la población, de entidades del gobierno federal y de particulares que se dedican a la recolección de DSM. Entre los municipios conurbados al Sitio B que hacen uso del depósito se encuentran: Ánimas Trujano, San Agustín de las Juntas, San Agustín Etla, San Agustín Yaterini, San Antonio de la Cal, San Bartolo Coyotepec, San Francisco Chaligoló, San Jacinto Amilpas, San Pablo Etla, San Raymundo Xalpa, San Sebastián Tutla, Santa Cruz Amilpas, Santa Cruz Xoxocotlán, Santa Lucía del Camino, Santa María Coyotepec, Santa María El Tule, Tlaxiáctac de Cabrera y Villa de Zaachila.

La generación de desechos en el Sitio B en 1997, y las proyecciones para los años 2000, 2005 y 2010 se presentan en el Cuadro 3.2.

**Cuadro 3.2. Proyección de generación total y per capita para el Sitio B - Oaxaca de Juárez (INE, 1997)**

Sitio Ciudad	Generación total 1997 (ton/año)	Generación per capita 1997 (kg/hab/día)	Generación total 2000 (ton/año)	Generación per capita 2000 (ton/hab/día)	Generación total 2005 (ton/año)	Generación per capita 2005 (kg/hab/día)	Generación total 2010 (ton/año)	Generación per capita 2010 (kg/hab/día)
"B" Oaxaca de Juárez	93,924	1.0027	105,661	1.0527	128,173	1.1480	154,326	1.2521

### 3.1.3. "Sitio C", estación del Metro de la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con más de 20 millones de habitantes de los cuales un gran número requiere transportarse día con día a sus hogares, a los centros laborales y a otros destinos en transporte público. Uno de ellos es el denominado Metro (Sistema de Transporte Colectivo) de la Ciudad de México, cuenta con 11 líneas de tipo subterráneo, terrestre y elevado que cruzan de norte a sur y de oriente a poniente la ciudad e internándose en algunos municipios conurbados del vecino Estado de México, cuyos habitantes utilizan también este transporte capitalino.

El Metro de la Ciudad de México es uno de los más grandes del mundo y uno de los que transporta más personas, su nombre proviene de la palabra "Metropolitano", que le fue denominado en Francia, porque la finalidad de este sistema de transporte es cubrir los puntos estratégicos de toda la Metrópoli. En otros países recibe el nombre de subterráneo o tren, como es el caso de Londres y los instalados en los Estados Unidos de América.

En 2004, el SCT reporta 1,321'496,559 de pasajeros movilizados en la red conformada por 11 líneas (Líneas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A y B). El promedio de usuarios transportados en un día laborable es de 4'432,662. La afluencia máxima reportada durante 2004 fue de 4'833,433<sup>35</sup>.

La estación elegida para la toma de la muestra fue la estación Garibaldi de la Línea B, la cual tiene correspondencia con la Línea 8.

En el Sitio C "Estación del Metro", dentro de la misma hay múltiples contenedores de desechos tipo cenicero de los cuales el personal de limpieza va recogiendo los mismo y depositándolos en bolsas negras, la muestra se tomó del total de desechos recolectados

<sup>35</sup> Fuente: Página Web del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México. (actualizado a mayo de 2005) <http://www.metro.df.gob.mx/accinformacion/index.htm#fr7>

durante todo un día cuando ha quedado lista para ser recolectada por una empresa privada contratada por el STC<sup>36</sup>.

La generación de desechos en la Ciudad de México en 1997, y las proyecciones para los años 2000, 2005 y 2010 se presentan en el Cuadro 3.3.

**Cuadro 3.3. Proyección de generación total y per capita para la Ciudad de México (INE, 1997)**

Ciudad	Generación total 1997 (ton/año)	Generación per capita 1997 (kg/hab/día)	Generación total 2000 (ton/año)	Generación per capita 2000 (ton/hab/día)	Generación total 2005 (ton/año)	Generación per capita 2005 (kg/hab/día)	Generación total 2010 (ton/año)	Generación per capita 2010 (kg/hab/día)
D. F.	4'767,366	1.3474	5,363,358	1.4246	6,517,714	1.5729	7,879,923	1.7376

<sup>36</sup> Información verbal del Jefe en turno de la Estación Garibaldi, línea B del Metro.

### 3.2. Toma de muestras y determinaciones "in situ"

La Norma Mexicana NMX-AA-015-1985<sup>37</sup>, establece que la muestra a obtener mediante el método de cuarteo debe ser representativa de la zona o estrato socioeconómico del área en estudio, por lo que se debe obtener de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-061-1984<sup>38</sup>, que establece el procedimiento para determinar la generación y obtención de la muestra.

En este trabajo, se decidió no llevar a cabo el procedimiento indicado en la Norma NMX-AA-061-1984, con base en los siguientes razonamientos:

- No se contó con la cantidad de recursos humanos y económicos suficientes, para determinar la generación de desechos de cada sitio,
- El objetivo principal de este estudio consiste en valorizar los DSM después de que han sido sujetos de pepena<sup>39</sup>, ya que durante ésta, cierto porcentaje de los desechos que son recolectados se reciclan o apartan y no llegan al sitio de disposición. El objetivo de la Norma NMX-AA-061-1984, es diferente, puesto que señala que la toma de muestras se debe realizar antes de ser recolectada por el servicio de limpia. En este sentido, la muestra de desechos tomada del tiradero pierde representatividad bajo los objetivos de esta Norma Mexicana,
- Asimismo, la Norma NMX-AA-061-1984, especifica que la muestra obtenida debe ser representativa del estrato socioeconómico de donde se generó. La representatividad de la muestra recolectada se garantiza, con base en el conocimiento de su origen. Para ello en este trabajo se realizó la toma de muestras con base en los tres estratos socioeconómicos:

<sup>37</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Método de cuarteo. (SECOFI, 1985)

<sup>38</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Generación. (SECOFI, 1984)

<sup>39</sup> En general, durante el recorrido de los camiones recolectores se realizan actividades de pepena mediante la cual los "macheteros" o ayudantes se encargan de seleccionar y separar los subproductos con algún valor económico para su venta, entre estos se encuentra, el aluminio, el cartón, el vidrio, las latas estañadas y el papel, principalmente (Severino, 1995).

- I. Zona de clase alta (a)
- II. Zona de clase media (m)
- III. Zona de clase baja (b)

En este caso se procedió entonces a agrupar las rutas por estrato socioeconómico y se eligió de manera aleatoria exclusivamente una ruta que representara cada estrato. Una vez seleccionado el conjunto de rutas, se hizo el traslado a campo de los materiales y equipo necesarios para la toma de muestras señalados en la Norma Mexicana NMX-AA-015-1985. La información de la muestra tomada se vació en el la Cédula de Informe de Campo para el Cuarteo de los Desechos Sólidos (Apéndice II), conforme a la NMX-AA-015-1985.

En los Sitios A y B, la toma de muestras se realizó directamente en el sitio de disposición de los DSM.

Las muestras del sitio A se tomaron en el mes de septiembre (otoño), las muestras del sitio B se tomaran en el mes de diciembre (invierno) y la muestra del sitio C se tomó en el mes de febrero (invierno)<sup>40</sup>.

---

<sup>40</sup> En el Sitio A, se contó con el apoyo de la empresa Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, S.A. de C.V. y de la Dirección de Limpia del Gobierno Municipal; en el sitio B el apoyo fue brindado por el Instituto de Ecología del Estado y de la Dirección de Limpia del Gobierno Municipal. En el Sitio C, se solicitó el apoyo del Jefe en turno de la estación del Metro y del personal de limpieza para tomar la muestra de los desechos.

### 3.2.1. Sitios A y B

En los Sitios A y B, se realizó el mismo procedimiento de muestreo con base en las Normas Mexicanas NMX-AA-015-1985 y NMX-AA-052-1985<sup>41</sup>, realizándose modificaciones de acuerdo a la infraestructura disponible en cada lugar de disposición final de los DSM (Figuras 3.2 a y b). El tamaño de la muestra recolectada para cada estrato socioeconómico fue aproximadamente de 200 kg, a partir de la cual se realizaron determinaciones in situ y se obtuvo la porción para la determinación de poder calorífico. Las actividades desarrolladas en los Sitios A y B fueron las siguientes:

- *Coordinación con el personal encargado del lugar de disposición final de los DSM para contar con las facilidades necesarias, en cuanto a uso de instalaciones, toma de muestras y determinaciones "in situ":*

Consistió en solicitar un espacio adecuado para depositar las muestras tomadas, realizar el cuarteo y determinaciones sin obstaculizar las actividades llevadas a cabo dentro del depósito de desechos (Figuras 3.2 a y b).



Figura 3.2a. Trabajo en campo, Sitio A

<sup>41</sup> NMX-AA-052-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Preparación de Muestras en el Laboratorio para su Análisis (SECOFI, 1985)



Figura 3.2b. Trabajo en campo, Sitio B

o *Preparación del área elegida para el manejo de las muestras y su cuarteo*

El área designada para el cuarteo cumplió en ambos sitios con lo señalado en la NMX-AA-015-1985 con respecto al lugar para realizar el cuarteo: área horizontal con piso de cemento y bajo techo. La preparación consistió en la limpieza y señalización de la misma (división del área de cuarteo en cuatro partes iguales: A, B, C y D (Figura 3.3).

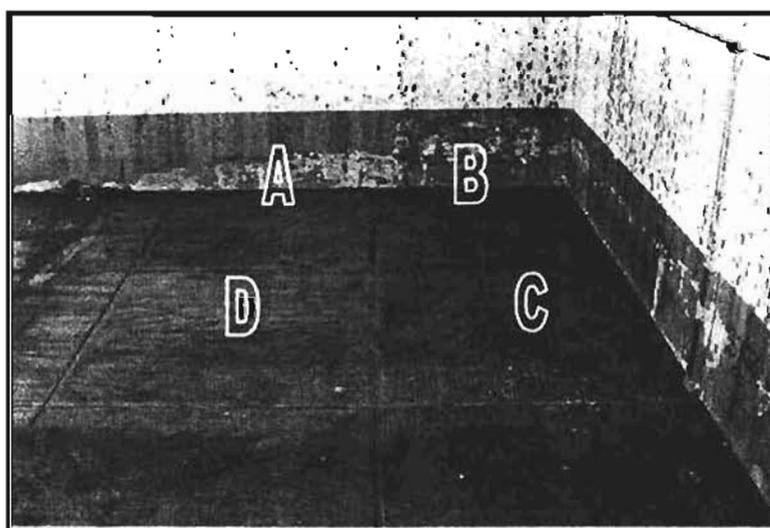


Figura 3.3. Área elegida para el cuarteo de muestras de DSM

- o *Desvío de los camiones recolectores para depositar su contenido en el área de cuarteo*  
Se solicitó a los encargados del acceso al lugar de disposición final que los camiones que cubrieran las rutas elegidas de acuerdo a cada estrato socioeconómico, que depositaran los DSM en el área de cuarteo y no en el frente de tiro<sup>42</sup>. (Figura 3.4)



Figura 3.4. Depósito de los DSM en el área de cuarteo

- o *Cuarteo de muestras*

El procedimiento se realizó conforme a lo establecido en la Norma NMX-AA-015-1985. Una vez depositado el montón de desechos, por el camión recolector se procedió a homogenizarlos mediante paleo (Figuras 3.5 y 3.6).

<sup>42</sup> Área del sitio de disposición donde llegan a depositar los DSM los camiones recolectores, en éste se encuentra un tractor que compacta los desechos y personas dedicadas a la pepena.



Figura 3.5. Montón de desechos depositado

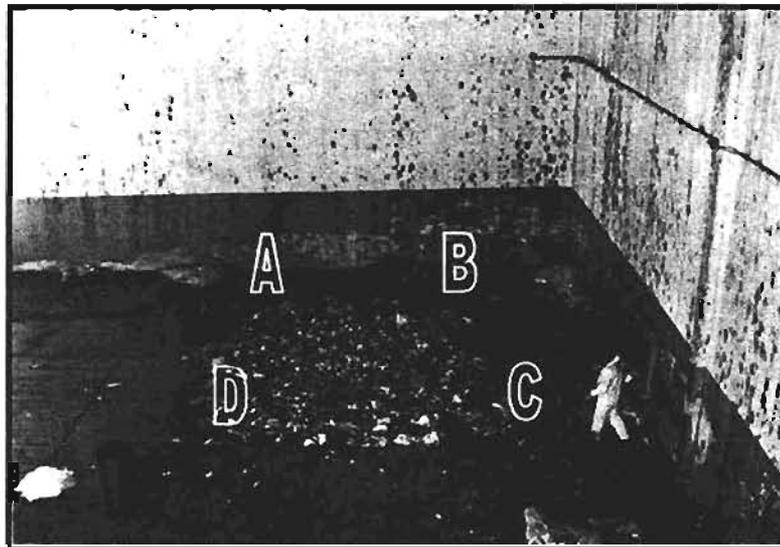


Figura 3.6. Paleo y homogenización

El montón homogenizado se esparció en cuatro partes iguales, A, B, C y D (Figura 3.6), de las cuales se eliminaron de forma aleatoria las partes opuestas A y C ó B y D. El cuarteo se repitió una vez más con las dos partes restantes para dejar aproximadamente

50 kg de desechos, con los cuales se realizó la Selección y Cuantificación de Subproductos de acuerdo a la Norma NMX-AA-22-1985<sup>43</sup>.

De las partes eliminadas en el primer cuarteo, se tomaron aproximadamente 10 kg de desechos para el análisis de laboratorio. En la fracción restante (de aproximadamente 50 kg) se determinó el peso volumétrico “*in situ*”, según la Norma Mexicana NMX-AA-19-1985<sup>44</sup>.

o *Selección y cuantificación de subproductos*

Como se mencionó, la muestra utilizada para la selección y cuantificación de subproductos, se extrajo de las áreas del primer cuarteo que no fueron eliminadas (NMX-AA-015-1985), y tomando como mínimo 50 kg de la misma.

*Selección.* El procedimiento consistió en seleccionar los subproductos de acuerdo a la clasificación presentada en la Norma NMX-AA-22-1985 (Cuadro 3.4), colocándose en bolsas de polietileno hasta agotar la muestra (Figura 3.7).

**Cuadro 3.4. Clasificación de los DSM, (Fuente: NMX-AA-015-1985)**

Subproducto	Subproducto
1 Algodón	4 Residuo fino (todo material que pase la criba M 2.00)
2 Cartón	5 Envase de cartón encerado
3 Cuero	6 Fibra dura vegetal (esclerénquima)
7 Fibras sintéticas	17 Pañal desechable
8 Hueso	18 Plástico rígido y de película
9 Hule	19 Poliuretano
10 Lata	20 Poliestireno expandido

<sup>43</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos (SECOFI, 1985)

<sup>44</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico “*in situ*” (SECOFI, 1985)

Subproducto	Subproducto
11 Loza y cerámica	21 Residuos alimenticios
12 Madera	22 Residuos de jardinería
13 Material de construcción	23 Trapo
14 Material ferroso	24 Vidrio de calor
15 Material no ferroso	25 Vidrio transparente
16 Papel	26 Otros



Figura 3.7. Selección y cuantificación de subproductos

*Cuantificación.* Los subproductos ya clasificados se pesaron por separado

El porcentaje en peso de cada uno de los subproductos se calcula con la siguiente expresión:

$$PS = \frac{G_i}{G} \times 100$$

En donde:

$PS$  = Porcentaje del subproducto considerado

$G_i$  = Peso del subproducto considerado, en kg; descontando el peso de la bolsa empleada

$G$  = Peso total de la muestra (mínimo 50 kg)

El resultado obtenido al sumar los diferentes porcentajes, debe ser como mínimo el 98% del peso total de la muestra ( $G$ ). En caso contrario, se debe repetir la determinación.

El detalle de los resultados obtenidos de la Selección y Cuantificación de Subproductos en los casos que se pudo realizar de los Sitios A y B, se encuentran en el Apéndice II.

o *Determinación de peso volumétrico "in situ"*

El peso volumétrico se define como el peso de un material por unidad de volumen (por ejemplo,  $\text{kg/m}^3$ ). Los datos sobre el peso volumétrico son necesarios para evaluar la masa y el volumen total de los desechos que tienen que ser gestionados (Tchobanoglous, 1993).

La determinación de peso volumétrico "*in situ*" se basó en el procedimiento señalado en la Norma NMX-AA-019-1985<sup>45</sup>. Para lo cual se tomaron los desechos eliminados de la primera operación del cuarteo.

Para la determinación se utilizaron: una báscula de piso con capacidad de 500 kg y tambos con capacidad de 200 L (como los utilizados para contener lubricantes). Antes de efectuar la determinación se verificó que el recipiente estuviera limpio y libre de abolladuras o fisuras; así como la correcta calibración de la báscula. A continuación, se pesó el recipiente vacío, tomando este peso como la *tara* del recipiente. El volumen del tambo se calculó con base en la geometría de un cilindro.

---

<sup>45</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico "*in situ*"

El recipiente se llenó hasta el tope con los desechos homogeneizados, y se dejó caer contra el suelo varias veces, permitiendo así un mejor llenado del mismo. Nuevamente se agregaron desechos hasta su llenado, sin ejercer presión alguna (compactación), evitando con esto alterar el peso volumétrico que se va a determinar (Figura 3.8). En el llenado del recipiente se incluyeron los finos<sup>46</sup>



Figura 3.8. Determinación del peso volumétrico de las muestras de DSM

Para obtener el peso neto de los residuos sólidos, se pesó el recipiente lleno y se restó el valor de la *tara*.

#### *Cálculos*

El peso volumétrico del residuo sólido se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$P_v = \frac{P}{V}$$

<sup>46</sup> Materiales que pasen la malla 2.0 Mesh, incluyendo el polvo de barrido

En donde:

$P_v$  = Peso volumétrico del residuo sólido, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$p$  = Peso de los residuos sólidos (peso bruto menos *tara*), en kg

$V$  = Volumen del recipiente, en  $\text{m}^3$

Los resultados obtenidos de las determinaciones realizadas a algunas muestras obtenidas en los sitios A y B se reportan en el Apéndice II.

o *Preparación de muestras para su traslado al laboratorio*

La muestra de 10 kg., procedente de los cuarteos se trasladó al laboratorio en bolsas de polietileno (Figura 3.9).

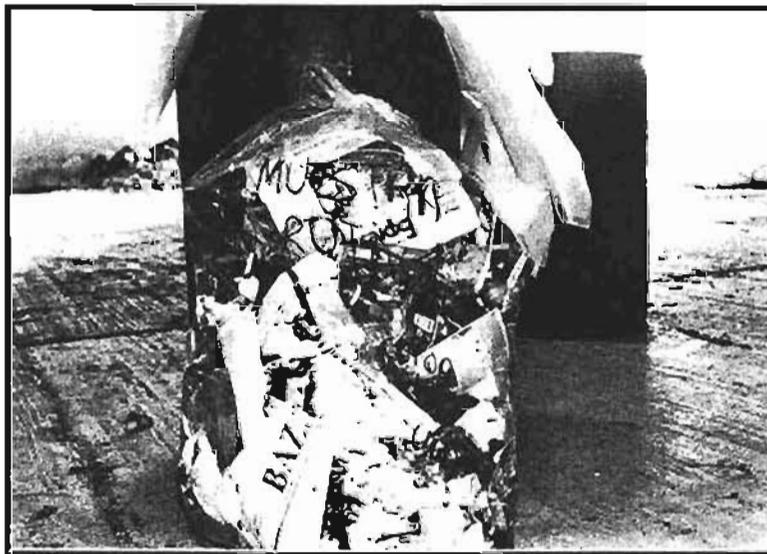
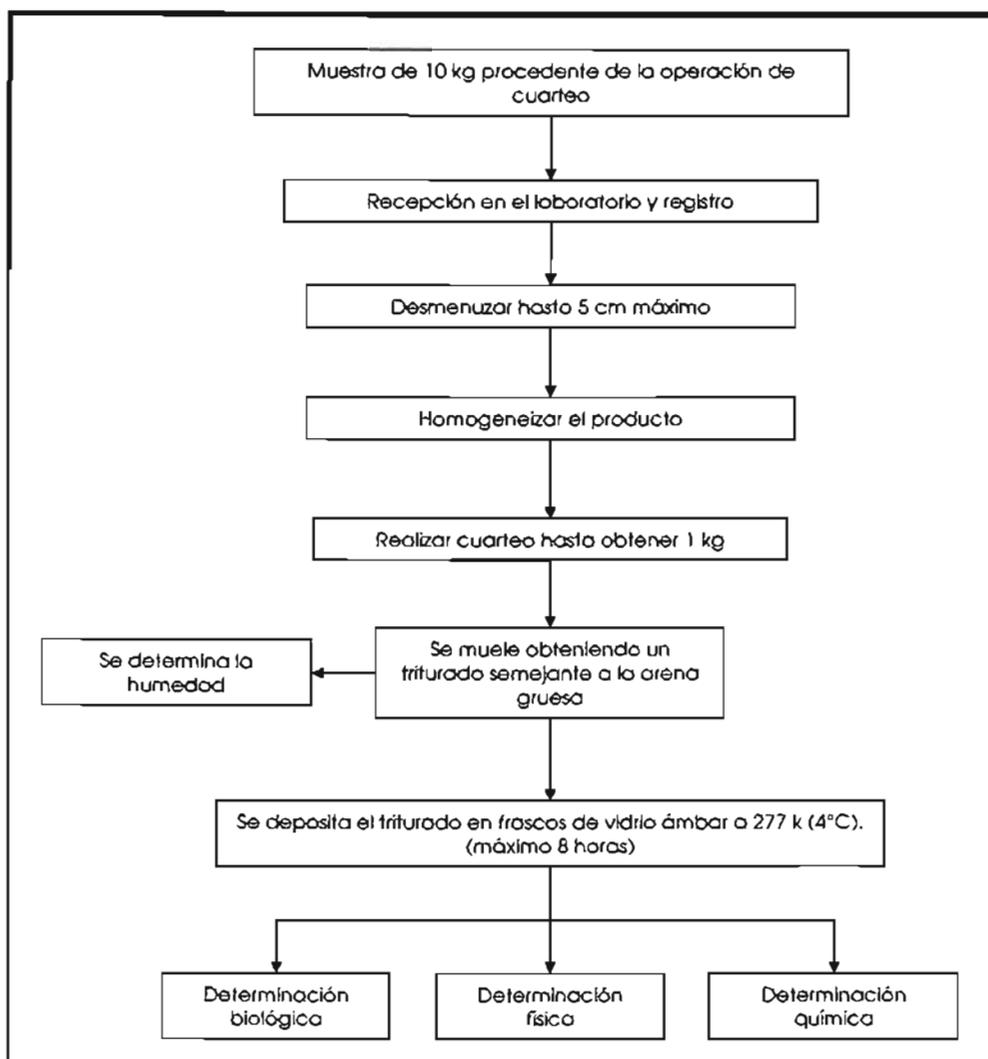


Figura 3.9. Muestra para ser trasladada a laboratorio

o *Preparación de las muestras para su traslado al laboratorio*

En la Figura 3.10 se presenta el diagrama del procedimiento señalado en la Norma Mexicana NMX-AA-052-1985, para el traslado de la muestra al laboratorio.

En el Sitio A, las muestras se trasladaron en paquetes sellados al laboratorio donde se trituraron. En el Sitio B, se pudo trasladar el equipo de trituración a campo facilitando el manejo de las mismas para su ingreso al laboratorio donde se determinaría su PC.



Fuente: Norma Mexicana, NMX-AA-052-1985

Figura 3.10. Diagrama para la preparación de muestras para su traslado al laboratorio

Una vez tomadas las muestras se procedió a la trituración de las mismas, para ello se utilizó un molino especial para desechos sólidos y lodos de plantas de tratamiento. El Molino triturador corresponde al modelo Mini Monster® 20000 de la marca JWC Environmental, (Figura 3.11).

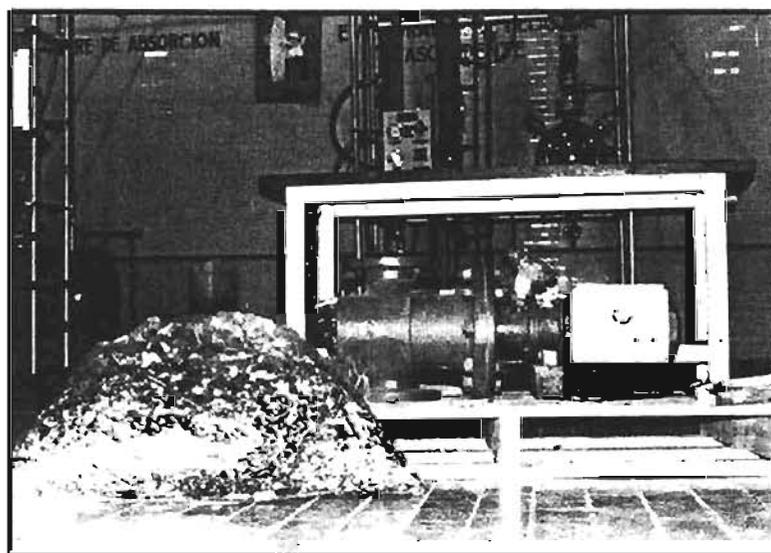


Figura 3.11. Molino Mini Monster® 20000 y muestra triturada

La muestra triturada se depositó sobre un área limpia para homogenizarla mediante paleo y cuarteo (Figura 3.12), hasta obtener aproximadamente 1 kg de la misma, de la cual se tomó una fracción para determinar su contenido de humedad y en ambos casos se trasladó al Laboratorio Central de Biología Ambiental-Gobierno del Distrito Federal (LCBA-GDF), para la determinación experimental de su poder calorífico.

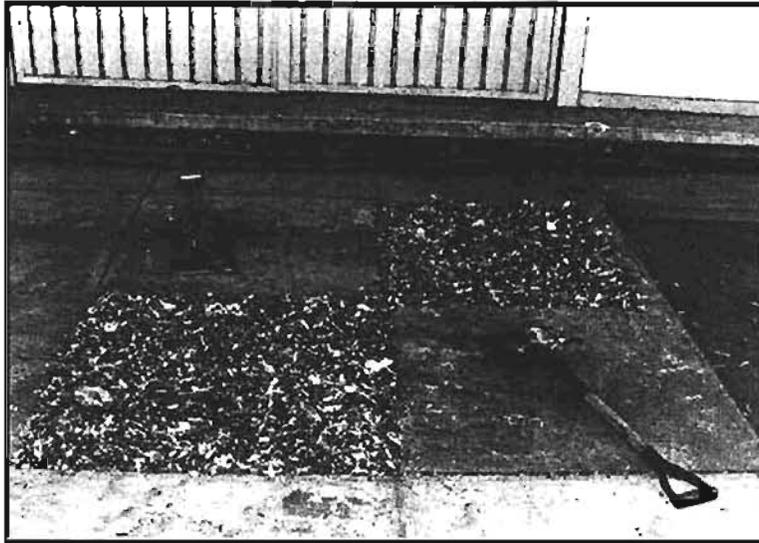


Figura 3.12. Muestra triturada lista a ser llevada a laboratorio

#### Notas aclaratorias:

1. Debido a la capacidad de trituración del molino Mini Monster 2000, no fue necesario desmenuzar los desechos, a demás de que en el caso de los materiales plásticos (envases de PET<sup>47</sup>), resulta muy difícil, su corte con tijeras).
2. Los análisis realizados no contemplan aspectos biológicos (principalmente realizados en estudios de composteo), por lo tanto no se requirió refrigerar las muestras, siendo trasladadas al LCBA-GDF, en bolsas de polietileno a temperatura ambiente. Adicionalmente las muestras recolectadas representan el CDD, ya que no contienen más del 20% de materia orgánica biodegradable.

#### 3.2.2. Sitio C

Para el Sitio C, únicamente se determinó el poder calorífico de la muestra tomada en la estación Garibaldi del Metro.

---

<sup>47</sup> Polietilen Tereftalato, utilizado generalmente en la elaboración de envases de refrescos

### 3.3. Análisis de laboratorio

El análisis de laboratorio consistió en la determinación del poder calorífico (en kcal/kg) y del contenido de humedad (en porciento en peso), de las muestras tomadas.

#### 3.3.1. Determinación de poder calorífico

Como se ha mencionado los calores de formación se pueden determinar mediante una medición directa, especialmente los calores de combustión. Con éste método, una muestra del material o muestra se quema en una atmósfera de oxígeno y el calor que se desprende se mide mediante un *calorímetro* de combustión o bomba calorimétrica. En la Figura 3.13, se muestra el corte transversal de una bomba calorimétrica. (Crockford y Knight, 1968).

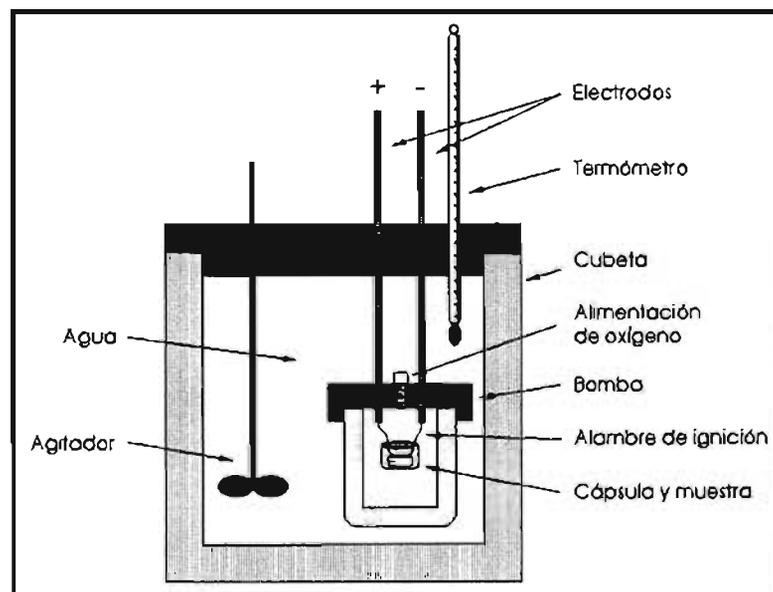


Figura 3.13. Sección transversal de la Bomba Calorimétrica

## Breve descripción del procedimiento

La muestra de masa conocida se coloca en una cápsula dentro de la bomba calorimétrica y se pone en contacto con un tramo de alambre de ignición el cual se calienta mediante una fuente externa de corriente conectada a un par de electrodos. La bomba se llena entonces con oxígeno y se coloca dentro de la cubeta del calorímetro que contiene una masa conocida de agua, para mantener una temperatura uniforme del agua se utiliza un agitador. La cubeta, a su vez, está rodeada por un espacio con aire que actúa como aislamiento e impide que haya pérdidas excesivas de calor a los alrededores paredes adiabáticas. La muestra se enciende calentando el alambre fusible al rojo vivo mediante corriente eléctrica. El calor que desprende la muestra durante su combustión provoca, por medio de la transferencia de calor a los alrededores, la elevación de la temperatura del agua de la cubeta, que es medida por un termómetro con graduación de 0.02 °C.

En este procedimiento se utiliza para obtener la *capacidad calorífica* del calorímetro, que se determina quemando una pastilla de ácido benzoico de alta pureza, cuyo calor de combustión se conoce y para determinar el poder calorífico de la muestra problema.

Una vez obtenidos los datos del comportamiento de la temperatura del sistema, se procede a realizar los cálculos con las fórmulas matemáticas establecidas para determinar el poder calorífico. Asimismo, se realizan las correcciones teóricas necesarias.

## Procedimiento Experimental

A continuación se presenta el procedimiento llevado a cabo en las instalaciones del LCBA-GDF para la determinación del poder calorífico (PC) de las muestras colectadas de DSM, con base en la Norma Mexicana NMX-AA-033-1985<sup>48</sup>. El diagrama del procedimiento se presenta en la Figura 3.14.

---

<sup>48</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Poder Calorífico Superior (SECOFI, 1985)

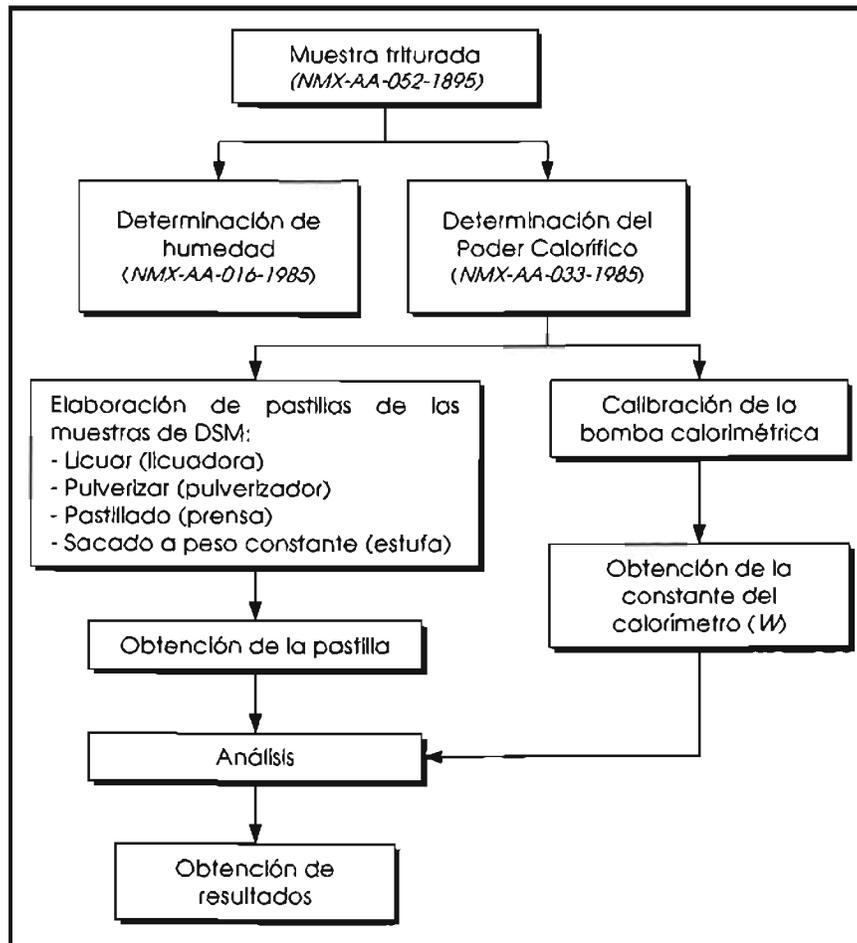


Figura 3.14. Diagrama del procedimiento realizado en laboratorio

Nota: en el procedimiento experimental se pueden observar algunas modificaciones realizadas a la NMX-AA-033-1985, (letras en cursiva) siendo éstas el reflejo de los pasos seguidos en la práctica, también se agregan algunos pasos (frases subrayadas) y se señalan las variables a utilizar en las fórmulas para el cálculo del PC con el propósito de optimizar el procedimiento experimental.

### Objetivo

Determinar el poder calorífico superior (PCS) de muestras de DSM.

### Definición

El PCS es el calor producido en la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido bajo volumen constante dentro de una bomba calorimétrica en condiciones específicas, tales que toda el agua de los productos permanezca en estado líquido (NMX-AA-033-1985).

### Equipo

- Bomba calorimétrica marca Parr, modelo 1341; formada por un recipiente equipado con una camisa de agua y con una cubierta para protegerla de las corrientes de aire, la temperatura uniforme de la cubeta de agua se obtiene con un aparato de agitación (Figura 3.15)

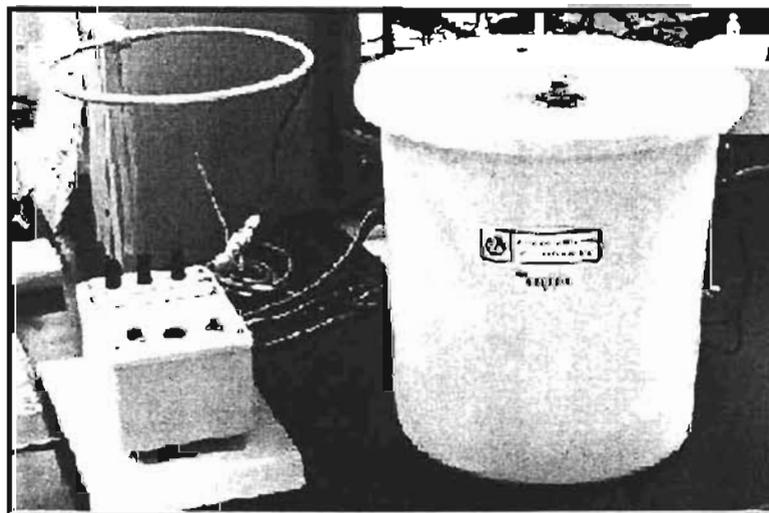


Figura 3.15. Bomba calorimétrica, unidad de ignición y soporte, Parr Instruments Modelo 1341

- Bomba de oxígeno marca Parr, modelo 1108
- Unidad de ignición de 23 V

- Prensa pastilladora, debido a que no se contó con la prensa especificada para elaborar las pastillas, se utilizaron en su lugar un juego de suajes y un émbolo de madera, materiales con los que se obtuvo satisfactoriamente la pastilla de la muestra problema. Para facilitar la aglomeración de la muestra se utilizó agua; una vez formada la pastilla, ésta se secó a peso constante, tal y como se requiere para la determinación.
- Termómetro, con intervalo de 19 – 35 °C y graduación de 0.02 °C
- Soporte para el montaje de la bomba de oxígeno
- Balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg
- Balanza con capacidad mínima de 2.0 kg y sensibilidad de 0.1 g
- Cápsula de hierro de 2.5 a 5 cm<sup>3</sup> de capacidad
- Cronómetro
- Tanque de oxígeno con pureza del 99.9% con dos manómetros, uno que indique la presión interior del tanque y otro, la presión de la bomba
- Estufa con rango de temperatura ambiente a 80 °C (353 K)

#### *Materiales*

- Bitácora
- Alambre de encendido de hierro puro, de 0.15 mm de espesor y 10 cm de longitud, con su conductividad térmica conocida

#### *Reactivos*

- Pastilla de ácido benzoico de poder calorífico conocido y de peso no mayor a 1.5 g
- Solución valorada de carbonato de sodio 0.0725 N
- Solución alcohólica de indicador anaranjado de metilo al 1%

### Obtención de la muestra

1. La muestra se obtiene según la Norma Mexicana NMX-AA-052-1985, en cantidad suficiente para efectuar una serie de tres determinaciones como mínimo
2. La muestra de desechos se pulveriza y se forma una pastilla de peso conocido que se seca a peso constante ( $m$ ), el cual deberá estar entre 0.6 y 1.1 g.

### Calibración de la bomba calorimétrica

El procedimiento descrito a continuación se aplica para la calibración del calorímetro y para la determinación del poder calorífico de las muestras. El equipo se calibra usando como material combustible una pastilla de ácido benzoico de alta pureza de peso conocido, no mayor a 1.5 g.

1. Pesar 2000 g de agua destilada en la cubeta del calorímetro ( $W_{i_{\text{Agua}}}$ ), debiendo estar de 1 a 2 °C por debajo de la temperatura ambiente. Registrar el peso y temperatura,
2. Medir un trozo de alambre de encendido cuya longitud sea de 10 cm ( $L_{i_{\text{alambre}}}$ ) y unirlo a los electrodos del cabezal como se muestra en la Figura 3.16.,
3. Introducir con unas pinzas la pastilla dentro de la cápsula metálica de combustión (*no tocarla con las manos para evitar que se impregne de grasa o se contamine*), acomodar el alambre de tal forma que permanezca en contacto con la muestra y sin que toque la cápsula,
4. Colocar en el interior de la bomba, 1 mL de agua destilada. *Con ello se realizará la corrección por la formación de ácido nítrico durante la combustión de la muestra,*

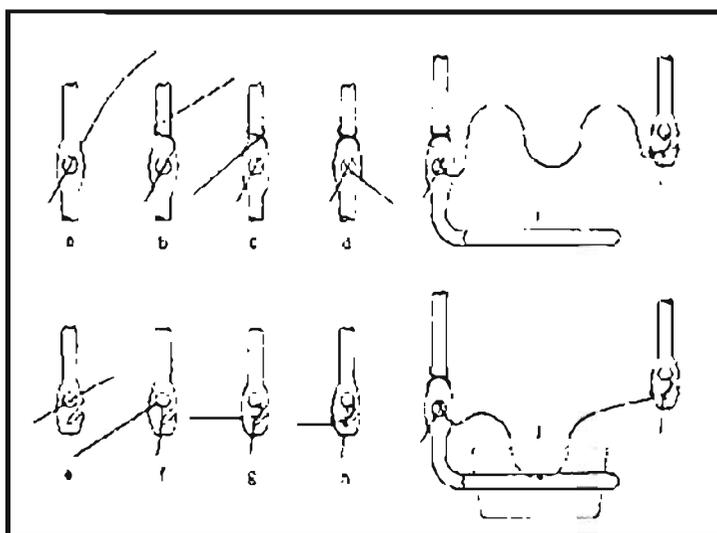


Figura 3.16. Pasos para ligar los extremos del alambre a los electrodos (Urquiza, 1969)

5. Cerrar la bomba enroscando el cabezal con el cilindro hasta lograr un cierre hermético. *Procurar no inclinar o mover mucho la bomba, ya que al interior puede provocarse un movimiento tanto de la pastilla como del alambre de ignición,*
6. Alimentar oxígeno lentamente al interior de la bomba, evitando la dispersión de la muestra que está en la cápsula, hasta alcanzar la presión recomendada de 30 atmósferas. *Si se excede la presión de 35 atmósferas, desalojar el oxígeno en su totalidad, cambiar la muestra por una nueva y repetir la determinación,*
7. Antes de separar la válvula de alimentación de la bomba, abrir la válvula de alivio del tanque de oxígeno, *con el fin de liberar el oxígeno que quedo en la manguera de alimentación,*
8. Conectar los electrodos en la parte superior de la tapa de la bomba e introducirla dentro de la cubeta empleando la pinza metálica provista para el equipo, *evitar en lo posible la pérdida de agua que hay dentro de la cubeta,*
9. Cerrar el calorímetro y bajar el termómetro que registra la temperatura del agua de la cubeta conjuntamente con el agitador. *Asegurarse de que no existan separaciones en la columna de mercurio, para ello auxiliarse del lente de aumento del termómetro,*

10. Encender el agitador del agua de la cubeta y mantenerlo operando un mínimo de 5 minutos hasta que no haya variación de temperatura en el tiempo (se alcance el *régimen permanente*), registrar la temperatura cada 1 minuto,
11. Una vez alcanzado el régimen permanente, registrar la temperatura ( $T_i$  ( $t = 0$ )), y proceder a la combustión de la muestra: oprimir el botón de encendido de la unidad de ignición por unos segundos (2 ó 3) al mismo tiempo que se acciona el cronómetro,
12. Tomar lecturas a los 35, 45, 60, 75, 90 y 105 segundos, después cada 30 segundos hasta que la temperatura permanezca constante durante 5 minutos o no exista variación máxima de  $\pm 0.1$  °C, en la temperatura del agua de la cubeta del calorímetro. Registrar la temperatura, ( $T_i$  ( $t = t$ )). *Se recomienda tomar lecturas cada 30 segundos, para facilitar el registro de datos,*
13. Levantar el termómetro y destapar el calorímetro, colocar la tapa en su soporte,
14. Desconectar los electrodos; y utilizando pinzas sacar la bomba de la cubeta, abrir la válvula de alivio de la misma lentamente, evitando un flujo de escape violento, para desalojar los residuos de la combustión,
15. Abrir la bomba y verificar que la combustión de la muestra haya sido completa, en caso contrario, repetir la determinación,
16. Transferir el contenido de la bomba a un vaso de precipitado y lavar las paredes de la misma, la tapa, los electrodos y la cápsula metálica con agua destilada y filtrar el lavado
17. Titular el filtrado con solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.1 N utilizando como indicador anaranjado de metilo o rojo de metilo hasta neutralizar la solución, teniendo en cuenta que 1 mL de solución de carbonato utilizado en la titulación, equivale a 1 caloría. *La solución se prepara disolviendo 3.84 g de carbonato de sodio en agua destilada y se afora a 1 litro.*
18. Medir los restos de alambre no quemado y restar la longitud inicial. De esta forma, se obtiene el valor de  $c_3$

## Determinación del Poder Calorífico de las muestras

Debido a lo heterogéneo de la muestra pulverizada de DSM y a la posible dificultad de compactar a la forma de una pastilla de peso señalado en el manual del equipo Parr (0.6 - 1.5g), se utilizó agua destilada como sustancia aglomerante para facilitar el manejo y la compactación de la misma<sup>49</sup>. Los pasos experimentales son los siguientes:

1. Formar y compactar con la muestra pulverizada de los DSM una pastilla con un peso aproximado al requerido (0.6 a 1.5 g),
2. Secar la pastilla a peso constante y pesar, el peso de la misma debe estar de 0.6 a 1.5 g. Registrar el peso ( $m$ ),
3. Seguir el procedimiento descrito para la calibración del calorímetro. Pasos del 1 al 18.

## Medidas de seguridad para el uso de la bomba calorimétrica

- La bomba no deberá cargarse con una muestra que desprenda más de 8,000 calorías cuando sea quemada en oxígeno, *por recomendación técnica del fabricante, Parr Instruments*,
- La presión inicial de oxígeno alimentado a la bomba no deberá exceder 35 atm (515 psig). De ser así, se debe desalojar todo el oxígeno y se trabajará con una nueva muestra,
- Se recomienda no colocar una muestra mayor de 1.1 gramos cuando se comience a analizar una muestra desconocida, con la posibilidad de utilizar una mayor cantidad de muestra cuando los análisis preliminares den resultados que estén entre los parámetros recomendados por el fabricante,
- Para evitar daños a la bomba y posible lesión al operador, la bomba nunca deberá ser cargada con una muestra combustible mayor a 1.5 gramos.

---

<sup>49</sup> Debido a que la muestra se va a secar a peso constante el contenido de humedad adicional no altera la composición de la misma con respecto a la propiedad que se determinará, que es el poder calorífico.

### 3.3.2. Determinación de humedad

La determinación del contenido de humedad de las muestras se realiza con base en la Norma Mexicana NMX-AA-016-1984<sup>50</sup>, que establece el método llamado de Estufa, mediante el cual se conoce el porcentaje de humedad contenido en los desechos sólidos municipales, tomando la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a condiciones de tiempo y temperatura dadas, y que tiene como resultado la eliminación de agua de la misma.

Para las muestras del Sitio A, la determinación se realizó con el uso de una balanza de humedad<sup>51</sup>:

- La muestra ya triturada se colocó en platos de aluminio y se introdujo en la balanza de humedad -marca Ohaus, modelo MB200-, durante 1 hr. A una temperatura de 105°C
- Una vez transcurrido el tiempo se obtuvo la lectura en cuanto a la pérdida de humedad que tuvo la muestra de DSM

Para las muestras del Sitio B, se aplicó el método de estufa, debido a que no se contó con balanza de humedad.

Los resultados obtenidos se reportan en la Sección 4.2.

---

<sup>50</sup> Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Humedad (SECOFI, 1984)

<sup>51</sup> Equipo facilitado por el LCBA-GDF, con este equipo se determina la pérdida de humedad de la muestra problema.

## 4. RESULTADOS

En el Cuadro 4.1 se presenta la relación de análisis y pruebas realizados a las muestras tomadas en los Sitios A, B y C.

**Cuadro 4.1. Análisis y pruebas realizados a cada muestra**

Análisis o prueba realizado	Muestra						
	Sitio A			Sitio B			Sitio C
	Clase Alta	Clase Media	Clase Baja	Clase Alta	Clase Media	Clase Baja	Muestra única
	Muestra (Aa)	Muestra (Am)	Muestra (Ab)	Muestra (Ba)	Muestra (Bm)	Muestra (Bb)	Muestra (MG)
Poder calorífico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Contenido de humedad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Selección y cuantificación de subproductos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Peso volumétrico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-

\* Entre paréntesis se encuentra la clave asignada a cada muestra

Debido a falta de recursos materiales no se realizaron las determinaciones de selección y cuantificación de subproductos, y de peso volumétrico a la muestra obtenida en el sitio C. Sin embargo, se pudo constatar que la composición de la muestra tomada contiene más del 80 por ciento de materiales no biodegradables, debido a que los usuarios del Metro-STC, depositan en los botes tipo cenicero de las estaciones, envases de PET, envases de Tetrapack®, plásticos de envoltura, envolturas de alimentos y papel, principalmente, así como mínimos residuos de alimentos, como son de frutas principalmente.

#### 4.1. Determinación de poder calorífico de las muestras de DSM

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la determinación del PC de las muestras tomadas. Los análisis se realizaron en las instalaciones del Laboratorio Central de Biología Ambiental del Gobierno del Distrito Federal. En primer lugar se realizó la calibración del calorímetro (marca Parr Instruments, modelo 1341), para determinar su equivalente energético de operación ( $W$ ), también denominado constante del calorímetro.

Con base en el valor de la constante del calorímetro, se realizó el análisis a las 7 muestras de desechos sólidos municipales tomadas; 3 muestras del Sitio A (clase alta, clase media y clase baja), 3 muestras del Sitio B (clase alta, clase media y clase baja) y 1 muestra del Sitio C. El análisis de cada muestra se realizó por triplicado.

#### Cálculos

En el Cuadro 4.2 se presenta la declaración de variables utilizadas en los cálculos para determinar el PC de las muestras de DSM.

**Cuadro 4.2. Declaración de variables**

Símbolo	Variable	Unidades
$W$	equivalente energético del calorímetro	[cal/ °C]
$K$	calor de combustión del alambre	[cal/g]
$G$	peso de la pastilla de ácido benzoico	[g]
$m$	peso de la muestra	[g]
$H$	poder de combustión del ácido benzoico	[cal/g]
$\Delta T$	diferencia de temperatura final menos temperatura inicial	[°C]
$e1$	corrección por el calor de formación del ácido. nítrico	[cal]
$e3$	corrección por el calor de combustión del alambre	[cal]
$C3$	diferencia de longitud inicial y final del alambre	[cm]

El detalle de los datos y resultados obtenidos en cada análisis se presentan en el Apéndice. Los cálculos se automatizaron mediante el uso de la Hoja de Cálculo de MS Excel; las ecuaciones utilizadas (NMX-AA-033-1985), se presentan a continuación:

- Ecuación para la corrección para el calor de combustión del alambre de encendido

$$e3 = K \cdot C3$$

- Ecuación para la calibración del calorímetro

$$W = \frac{H \cdot G + e1 + e3}{\Delta T}$$

- Ecuación para la determinación del PC de las muestras de DSM

$$PCS = \frac{T \cdot W - e1 - e3}{m}$$

Calibración del calorímetro Parr Instruments modelo 1341

Los resultados obtenidos de la calibración del calorímetro se presentan en el Cuadro 4.3. En el Cuadro 4.4 se presenta la estadística de los resultados obtenidos y el valor de la mediana que se utilizó como constante ( $W$ ) para el análisis de las muestras de DSM.

**Cuadro 4.3. Resultados obtenidos en la calibración del calorímetro**

Muestra-repetición	Valor del equivalente energético del calorímetro $W$ [cal/°C]
Ácido Benzoico 1	2427
Ácido Benzoico 2	2405
Ácido Benzoico 3	2453

**Cuadro 4.4 Estadística de los resultados obtenidos en la calibración del calorímetro**

Parámetro	[cal/°C]
Desviación Estándar	<b>± 24</b>
Media Geométrica	<b>2428</b>
Mediana	<b>2427</b>

Determinación del poder calorífico de las muestras de DSM

La determinación del poder calorífico se realizó tomando como base el valor de la mediana obtenida en la calibración del calorímetro Parr 1341, los valores del PC de las muestras tomadas en los Sitios A, B y C, se presentan en los cuadros 4.5, 4.6 y 4.7, respectivamente. Así mismo, por cada estrato socioeconómico seleccionado se presentan la desviación estándar, la media geométrica y la mediana, calculadas.

**Cuadro 4.5. Resultados obtenidos en la determinación del PC de las muestras de DSM del Sitio A**

Muestra	Poder calorífico PCS [kcal/kg]	Estadística		
		Desviación estándar	Media geométrica	Mediana
Aa-1	5353			
Aa-2	5334	107.5	5,281	5,334
Aa-3	5158			
Am-1	5572			
Am-2	5425	120.6	5,442	5,425
Am-3	5333			
Ab-1	5421			
Ab-2	5695	208.0	5,465	5,421
Ab-3	5287			

Cuadro 4.6. Resultados obtenidos en la determinación del PC de las muestras de DSM del Sitio B

Muestra	Poder calorífico PCS [kcal/kg]	Estadística		
		Desviación estándar	Media geométrica	Mediana
Ba-1	6097			
Ba-2	6077	226.5	5,953	6,077
Ba-3	5695			
Bm-1	5719			
Bm-2	5678	138.6	5,777	5,719
Bm-3	5936			
Bb-1	5610			
Bb-2	5016	323.5	5,232	5,091
Bb-3	5091			

Cuadro 4.7. Resultados obtenidos en la determinación del PC de la muestra de DSM del Sitio C

Muestra	Poder calorífico PCS [kcal/kg]	Estadística		
		Desviación estándar	Media geométrica	Mediana
MG-1	6035			
MG-2	5823	122.4	5963	6035
MG-3	6035			

\* Para facilitar la conversión de unidades, los resultados obtenidos en cal/g se presentan en kcal/kg

El Sitio A, ciudad y puerto del Pacífico, presenta una mediana de 5,334 kcal/kg para el estrato socioeconómico de clase alta; una mediana de 5,425 kcal/kg para clase media, y para las muestras de estrato bajo un valor de 5,421 kcal/kg, en este caso, la muestra Ab-2, es la que presenta el valor más alto de poder calorífico siendo éste de 5,695 kcal/kg. El valor de la mediana del PC de todas las muestras de DSM del Sitio A es 5,353 kcal/kg. Figura 4.1.

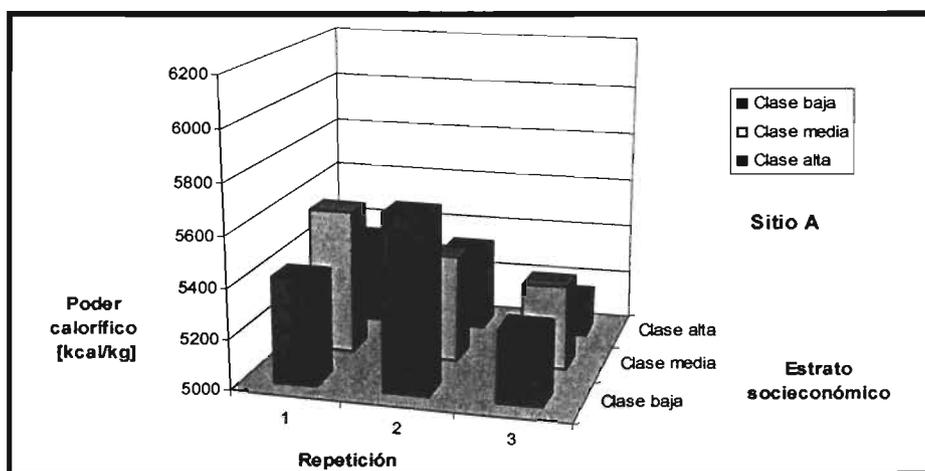


Figura 4.1. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio A

En el Sitio B, ciudad del sureste, se obtuvo una mediana del PC de 6,077 kcal/kg para la muestra tomada en el estrato socioeconómico alto; un valor de 5,719 kcal/kg para la muestra del estrato medio, y un poder calorífico de 5,091 kcal/kg para la muestra extraída en el estrato bajo. La mediana de todas las muestras del Sitio B es 5,695 kcal/kg. Figura 4.2.

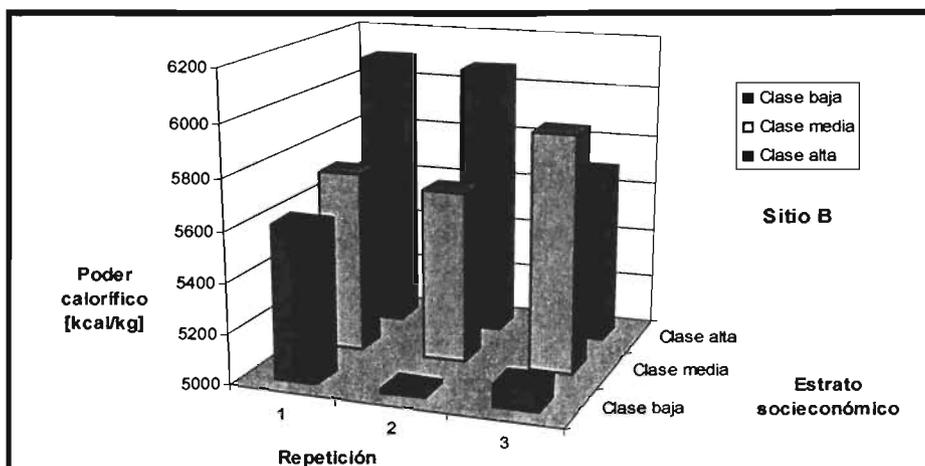


Figura 4.2. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio B

La muestra de DSM obtenida en la estación Garibaldi del Metro-STC de la Ciudad de México, Sitio C, tiene un valor de mediana de poder calorífico de 6,035 kcal/kg. Figura 4.3.

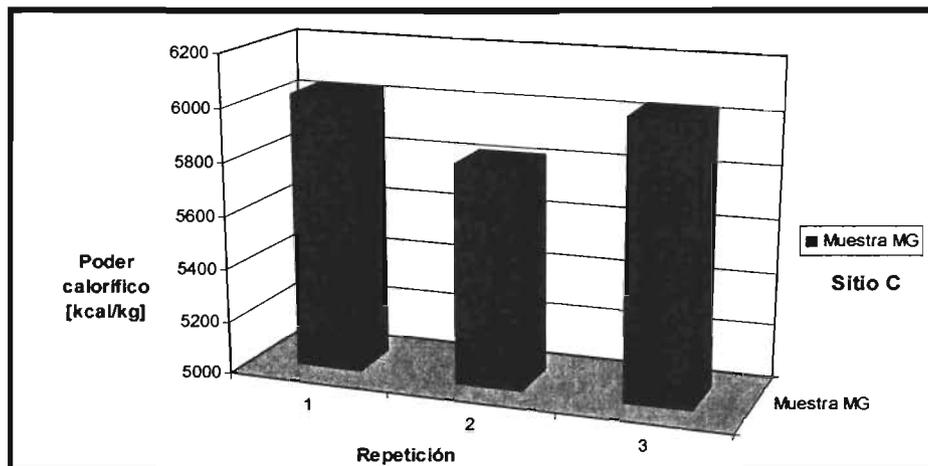


Figura 4.3. Grafica de los resultados del PC de las muestras del Sitio C

El valor de la mediana por estratos, estrato socioeconómico clase alta en los Sitios A y B es de 5,524 kcal/kg, para el estrato clase media es de 5,625 kcal/kg y el valor de la mediana del PC para el estrato de clase baja de 5,354 kcal/kg.

La mediana del poder calorífico de todas las muestras en conjunto tomadas en los Sitios A y B, es de 5,498 kcal/kg. Este valor aumenta un 2 por ciento si se incluyen los resultados obtenidos del Sitio C, obteniéndose un valor de 5,610 kcal/kg.

La media geométrica (promedio) del valor de poder calorífico de todas las muestras del Sitio A y del Sitio B es de 5,528 kcal/kg. La media geométrica del conjunto de muestras de los tres sitios es de 5,590 kcal/kg.

La desviación estándar en los análisis realizados es de 138.6 kcal/kg.

#### 4.2. Determinación de contenido de humedad

Los resultados de la determinación del contenido de humedad, en porcentaje en peso, en las muestras obtenidas en el Sitio A se presentan en el Cuadro 4.8, y los resultados de las muestras del Sitio B en el Cuadro 4.9.

**Cuadro 4.8. Contenido de humedad (porcentaje en peso) en las muestras del Sitio A**

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Humedad [%]	Sólidos [%]
Aa (clase alta)	20.2	15.9	<b>21.4</b>	78.6
Am (clase media)	18.5	11.8	<b>36.1</b>	63.9
Ab (clase baja)	20.7	14.0	<b>32.3</b>	67.7

**Cuadro 4.9. Contenido de humedad (porcentaje en peso) en las muestras del Sitio B**

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Humedad [%]	Sólidos [%]
Ba (clase alta)	232.6	166.4	<b>28.5</b>	71.5
Bm (clase media)	240.5	176.6	<b>26.6</b>	73.4
Bb (clase baja)	239.8	191.3	<b>20.2</b>	79.8

Los resultados obtenidos en el Sitio A, tienen una tendencia de mayor contenido de humedad en la clase baja (32.3 %) y menor contenido en la clase alta (21.4%) (Cuadro 4.8), la mediana del valor determinado es de 32.3. En el Sitio B se tiene una tendencia inversa a la encontrada en el Sitio A, es decir, se tiene un mayor contenido de humedad en la clase alta (28.5%) que en la clase baja (20.2%), el valor de la mediana del contenido de humedad en las muestras del Sitio B es de 26.6 (Cuadro 4.9).

La tendencia observada corresponde a diferentes causas, entre las cuales están la temporada del año y costumbres o eventos, al momento de tomar la muestra. Esto confirma que existe una gran variabilidad en la obtención de este tipo de datos.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El manejo actual de los DSM consiste básicamente en la disposición en relleno sanitario o en depósitos a cielo abierto que no cuentan con medidas de protección al entorno; producción de composta o incineración con o sin recuperación de la energía producida. En países como los EEUA, el número de rellenos sanitarios esta disminuyendo debido las medidas que se han implementado, como la reducción en la fuente, el reuso, el reciclado y la disposición controlada con el aprovechamiento de los desechos orgánicos biodegradables y la incineración.

En Europa y Asia oriental, las tecnologías basadas en la recuperación de energía, alternativas a la incineración, básicamente la pirólisis y la gasificación, a partir de los DSM con alto poder calorífico están en crecimiento. En estos procesos se separa la fracción orgánica biodegradable para elaborar composta, y la fracción con APC y bajo contenido de humedad para obtener combustible derivado de desechos (CDD) y generar energía. Estas tecnologías se encuentran en diferentes etapas: investigación, desarrollo, nivel de planta piloto, pequeña escala y en algunos casos nivel comercial para desechos con características específicas que no alteren las variables de proceso, por ejemplo, que admiten sólo cierto tipo de materiales de composición homogénea que se valoran con base en su poder calorífico y contenido de humedad.

En algunos casos, como en Japón o en Seattle, EEUA hay equipos de pirólisis funcionando a nivel comercial por lo que se puede prever que en el futuro va a crecer el uso de las tecnologías basadas en la *reducción* de los materiales en lugar de su *oxidación*, (como lo hace la incineración), lo que mejorará en forma sustancial el cuidado del medio ambiente. Inclusive, actualmente hay tecnologías que utilizan el material orgánico de bajo poder calorífico para producir energía como es una planta instalada en un aeropuerto de Tel Aviv, Israel. (Biocycle, 2005)

En México y países de Latinoamérica, los DSM se disponen en sitios a cielo abierto y en el mejor de los casos, en rellenos sanitarios (principalmente en grandes centros urbanos e industriales). En la Ciudad de México se instalaron equipos de incineración para DSM en la década de los años 70 en algunas estaciones de transferencia del Distrito Federal, sin embargo, debido a limitaciones técnicas y económicas estas instalaciones están actualmente en desuso.

En octubre de 2004, en la Ciudad de México se puso en marcha un sistema de recepción separada de desechos sólidos para mejorar su gestión. Sin embargo, aún no se tienen implantados sistemas para la valorización integral de los mismos que incluyan la recuperación de energía y sólo se reciclan ciertos subproductos.

El modelo económico-termodinámico y la clasificación de los desechos con base en el enlace químico y no por su origen, son las bases para un manejo eficiente de los mismos, ya que permite establecer centros de valorización que cuenten con las tecnologías adecuadas acordes a su composición, características ambientales y factores socio-económicos de cada sitio.

Como se ha mencionado la producción de CDD para la generación de energía o la producción de carbón, es actualmente una opción viable y sustentable condicionada por las características de los desechos, mismos que deben presentar un alto poder calorífico y un bajo contenido de humedad, principalmente (Energy International Agency).

Los valores del poder calorífico determinado en muestras de DSM tomadas en los Sitios A y B (dos ciudades de México) presentan una mediana de 5,498 kcal/kg. (23.0 MJ/kg). El poder calorífico de la muestra colectada en el Sitio C (estación del Metro) es de 6,035 kcal/kg (25.2 MJ/kg), esta muestra por su composición baja en materia orgánica biodegradable es representativa del CDD.

Los resultados obtenidos de la medición promedio del poder calorífico en las muestras del Sitio A resultan opuestos a los esperados. Es decir, las muestras del estrato socioeconómico bajo tienen un PC mayor al de las muestras del estrato socioeconómico alto (Cuadro 4.5 y Figura 4.1). En el caso de las muestras tomadas del Sitio B, se obtuvo un poder calorífico mayor para las muestras del estrato socioeconómico alto y valores decrecientes hacia el estrato de clase baja (Cuadro 4.6 y Figura 4.2).

Este comportamiento se explica porque las muestras se tomaron en dos diferentes épocas del año: la muestra del Sitio A en verano y la muestra del sitio B en invierno, además de que factores como costumbres, zona geográfica, clima y época influyen directamente en los resultados de acuerdo a Muñoz (1980) y Tchobanoglous (1993).

El PC obtenido experimentalmente en el conjunto de los tres sitios donde se tomaron las muestras es un 20 por ciento mayor al reportado por la European Commission (ver Cuadro 2.1), que es de 4,466 kcal/kg (18.7 MJ/kg), y con base en el Cuadro 2.2, corresponde al poder calorífico de los desechos plásticos, asimismo, concuerda con lo reportado por Steeping Forward (2005), en un análisis económico para evaluar la factibilidad de la valorización de los DSM mediante su transformación a CDD y utilizándolo como fuente de energía aprovechable en procesos de pirólisis o de gasificación.

En el estudio de Steeping Forward se calcula la energía recuperable de los desechos, la cual es de 2,148 a 2,270 kcal/kg (9 a 9.5 MJ/kg) cuando no hay una separación, y de 4,421 a 4,470 kcal/kg (18.5 a 18.7 MJ/kg) cuando la fracción con alto poder calorífico se separa y se seca (se transforma a CDD), en este caso el poder calorífico aumenta casi en un 100 por ciento y este mismo se puede incrementar si se retiran los subproductos con bajo poder calorífico y con alto contenido de humedad (principalmente la materia orgánica biodegradable).

De acuerdo a Minett (2003), los desechos con un poder calorífico de 3,556 kcal/kg (14.9 MJ/kg), asumiendo una generación convencional de energía eléctrica utilizando el CDD en

un proceso “desecho a energía” (pirólisis o gasificación), con una eficiencia del 35 por ciento y un 2.5 por ciento de pérdidas en la red de distribución, pueden generar 1.42 kWh/kg. (5.1 MJ/kg).

La generación de desechos sólidos en la Ciudad de México en 2005 corresponde a aproximadamente 12,000 ton<sup>52</sup> diarias, de las cuales con base en los datos del Cuadro 2.7, aproximadamente el 20 por ciento (plásticos + cartón y/o materiales derivados de la celulosa + otros subproductos denominados misceláneos), está conformado por subproductos con alto poder calorífico o es CDD, esto da aproximadamente 2,400 ton por día de CDD aprovechable.

Aplicando el valor de la mediana obtenido en los Sitios A y B (5,498 kcal/kg = 23 MJ/kg), y las condiciones de operación dadas por Minett, la generación de energía eléctrica es de 2.19 kWh/kg (7.8 MJ/kg).

Combinando ambos datos, en primer lugar generación eléctrica por kg de CDD (1.42 kWh) y en segundo lugar la generación de este CDD en la Ciudad de México en 2005, se tiene una generación de energía eléctrica de 5,256 kWh (5.2 MWh).

La compañía de Luz y Fuerza del Centro, que da servicio en la Ciudad de México, toma como base un consumo de 4.6 kWh diarios<sup>53</sup>. Por lo tanto la generación de energía eléctrica generada por el CDD (en el escenario establecido), puede ser suficiente para cubrir las necesidades de aproximadamente 1,142 domicilios particulares donde el consumo mensual de energía eléctrica sea de hasta 140 kWh.

Como se puede ver, las tecnologías “desecho a energía” proveen un doble beneficio, en primer lugar se elimina un pasivo ambiental (conformado por los rellenos sanitarios,

<sup>52</sup> Fuente: Gobierno del Distrito Federal. <http://www.df.gob.mx/ciudad/residuos/residuos01.html>

<sup>53</sup> El consumo para servicio doméstico es de 140 kWh mensual, cualquiera que sea la carga conectada individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda.. Fuente: Compañía de Luz y Fuerza del Centro [http://www.lfc.gob.mx/tarifas/tarifa\\_1\\_2004.htm](http://www.lfc.gob.mx/tarifas/tarifa_1_2004.htm)

principalmente), y se recupera energía que puede utilizarse en diferentes usos, uno de ellos corresponde al beneficio directo de la población, estos procesos alternativos a la incineración, pirólisis y gasificación, además que reducen las emisiones de efecto invernadero.

Con respecto a los resultados obtenidos de la determinación del contenido de humedad (en porcentaje en peso) en las muestras tomadas en los Sitios A y B, se tiene una mediana de 33.3 %<sup>54</sup>.

---

<sup>54</sup> Tchobanoglous (1993), reporta un rango típico del 15 al 40% en peso de contenido de humedad para DSM.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación de SIVD, no es privativa de economías de gran escala, y se puede aplicar en países como México, basado en estudios sobre generación y caracterización de los desechos, haciendo proyecciones a largo plazo para su uso y tomando en cuenta aspectos económicos, sociales, culturales, de clima y geográficos de la zona y de su área de influencia, principalmente.

Estos SIVD, pueden incluir la recuperación de energía de los desechos, mediante procesos de pirólisis y gasificación, y el aprovechamiento de la materia orgánica biodegradable para elaborar composta. Sin embargo, los sistemas requieren de una separación en la fuente generadora de los desechos, para ello es necesaria la aplicación de programas que eviten mezclar los desechos que pueden transformarse a CDD de los que no.

Por lo tanto es necesario realizar estudios específicos en las zonas donde se instalen los CIV y las posibles áreas de influencia para conocer la tendencia de generación de desechos a largo plazo, su composición, sus características y principalmente el poder calorífico del CDD, y elegir la tecnología “desecho a energía” que con el tiempo no llegue a ser obsoleta por razones de operación, mantenimiento y rentabilidad, debido a que el CDD modifique su composición.

Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo, sirven de referencia para futuras evaluaciones técnicas y económicas para la implementación de SIVD con procesos de recuperación de energía.

Los procesos de pirólisis y gasificación que están en uso comercial en otros países, deben ser flexibles y adaptables a las características de los DSM, generados en la región donde se instalen.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Atkins P. W. (1986).** *Fisicoquímica*. Sistemas Técnicos de Edición. México, 1986. 969 p.
2. **Barrow G. M. (1968).** *Química Física*. Edit. Reverté. Segunda Edic. España, 1968. 355-361 pp.
3. **Beede David. N. and Bloom David. E. (1995).** *The Economics of Municipal Solid Waste*. The World Bank Research Observer, 10(2), August, 113-150.
4. **Bauleo María (2002).** *Reporte de Argentina*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina. Ponencia presentada en el Seminario Internacional de Residuos realizado del 17 al 21 de junio de 2002 en el Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México. <http://www.ine.gob.mx/cenica/cydif/seminarios/a/> (consultada en agosto 2003).
5. **BioCycle, (2005).** Digester Plant Operates At Tel Aviv Transfer Station (Israel). Journal of composting and organics recycling. February 2005.
6. **Castellan Gilbert (1986).** *Fisicoquímica*. Addison-Wesley Iberoamericana. México, 1986. 835 p.
7. **Collazos Héctor (2002).** *El manejo de los residuos sólidos en Colombia*. Ponencia presentada en el Seminario Internacional de Residuos realizado del 17 al 21 de junio de 2002 en el Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México. <http://www.ine.gob.mx/cenica/cydif/seminarios/a/> (consultada en agosto 2003).
8. **Curzio, Alberto Q.; Prosperetti, Luigi; Zoboli, Roberto (1994).** *The management of municipal solid waste in Europe*. Elsevier. España, 1994.

9. **DEFRA (2005)**. Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Wastes. Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Waste Implementation Programme. United Kingdom. 21 p.  
[http://www.mkweb.co.uk/waste/documents/6\\_AdvancedThermalTreatment.pdf](http://www.mkweb.co.uk/waste/documents/6_AdvancedThermalTreatment.pdf)  
(consultada en marzo de 2005)
10. **Denisson, R.A. (1996)**. Environmental life-cycle comparisons of recycling, landfilling, and incinerations". Annual Reviews of Energy and Environment, Vol. 21. pp 191-237
11. **DETR (2000)**. Waste Strategy 2000, The Stationery Office. United Kingdom, 2000.  
<http://www.environment.detr.gov.uk/waste/strategy/cm4693/index.htm> (consultada en octubre 2003).
12. **DTI (2002)**. *Technical and Economic Assessment of Energy Conversion Technologies for MSW*. W R Livingston - Mitsui Babcock. Report No. BWM/00553/REP by DTI PUB URN NO: 02/1347 Department of Trade & Industry (DTI) Sustainable Energy Programmes. United Kingdom. 81 pp.
13. **Ebbing D. D. (1996)**. *Química General*. Edit. McGraw-Hill. 5ta. edic. México, p.p. 243-245
14. **El País (2003)**. "Las plantas incineradoras elevan el riesgo de malformación". Epidemiología–Sociedad. Martes 10 de junio de 2003, Pág. 28. Nota originada en Barcelona para el diario español El País.
15. **ENDA-SIDDHI (1998)**. *Prácticas de manejo adecuado en la disposición de desechos sólidos en el medio ambiente urbano asiático, un análisis regional*. Componente de investigación. Octubre de 1998.
16. **Energética XXI (2004)**. *¿De verdad se tratan los R.S.U. en España?*. Revista Energética XXI. Revista sobre generación de energía. Madrid, España. Abril 2004. pp. 52-57.
17. **EREN Web Site (2002)**. <http://www.ecn.nl/phyllis/>

- 
18. **European Commission (2003)**. Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (b4-3040/2000/306517/mar/e3). Final report. July 2003, 229 pp. Formato en PDF  
<http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/rdf.pdf>
19. **Fenton J. (1975)**. *Current trends in municipal solid waste disposal en New York City*. Resource Recovery and Conservation 1:167-176; K. Feindler. Paper prepared for the Energy Bureau, Inc. New York, 1976
20. **FICHTNER-ESTET (2004)**. *The Viability of Advanced Termal Treatment of MSW in the UK*. Fichtner Consulting Engineers Ltd - Environmental Services Training and Education Trust (ESTET). Published by ESTET, Reino Unido, marzo de 2004. 87 p.
21. **Finstein M. S., Miller F.C. & Storm P.F. (1986)**. "Waste treatment composting as a controlled system". Biotechnology. Vol. 8. Microbial Biodegradations. (W. Schonborn, ed.)
22. **Furedy Christine (1990)**. *Aspectos sociales de la recuperación de desechos de desechos sólidos en ciudades asiáticas* - Revistas de Saneamiento Ambiental. Centro de Información de Saneamiento Ambiental, Tailandia. 1990.
23. **GDF (2003)**. *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal*. Publicada el 22 de abril de 2003 en la Gaceta Oficial del Distrito Federal y en el Diario Oficial de la Federación. 26 pp..
24. **Glasstone S. (1960)**. *Tratado de Química Física*. Edit. Aguilar. Tercera Edic. España, 1960. 167-195 pp.
25. **Gutiérrez Ruiz, M., Cram Heydrich, S., Casanova del Ángel, F., Riva-Palacio Chiang S. (1994)**. *Manejo Integral de residuos industriales mezclados con domésticos*. Ver. 1.0. Editado por Logiciels, S.A. de C.V.. México. 152 pp.
26. **Gutiérrez Ruiz. M., Macías Guzmán P. (1999)**. *Sistemas integrales de valorización de desechos*. Rev. Panorama Ambiental. Diciembre 1999, Vol. 4, Núm. 1. pp. 21-27

- 
27. **Guzmán Macías P., Gutiérrez Ruiz. M., Nagel Bertram K., Montes Contreras L. (1999).** *Tecnologías tradicionales y de punta para el manejo de desechos peligrosos. Un análisis económico.* Memorias Sesión IV: Selección de Tecnologías del Simposio "Implicaciones económicas en el manejo de los residuos peligrosos". Colegio de Ingenieros Civiles de México. PUMA-INE-SEMARNAP-CONCAMIN. México, D.F., 8 de septiembre. 14 pp.
  28. **Hernández F. C., González M. S (editores) (1997).** *Reciclaje de residuos sólidos municipales.* Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM, 1997. pp. 84-89
  29. **IEA – CADDET (1998).** *Advanced Thermal Conversion Technologies for Energy from Solid Waste.* International Energy Agency (IEA) Bioenergy Programme - Centre for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET). August, 1998. 52 p. Sitio Web <http://www.caddet.org>
  30. **IEA Bioenergy – GasNet (2002).** Status of gasification in countries participating in the EIA biomass gasification and Gas Net activity. Kwant K. & Knoef H.. Sept., 2002. 118 pp.
  31. **INEGI (2002).** Sistema de Información Censal para los Estados de Colima y Oaxaca. Censo de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. <http://www.inegi.gob.mx>
  32. **INEGI (2005).** Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de basura 1995-2004. Estadísticas ambientales. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Sitio del INEGI en Internet. <http://www.inegi.gob.mx>
  33. **Jacobs Michael (1997).** La economía verde. ICARIA:FUHEM. 2ª. Edic. Barcelona. p.61
  34. **JFE (2004).** *Thermoselect Waste Gasification and Reforming Process.* Yamada S., Shimizu M., Miyoshi F. Technical Report No. 3 (July 2004). JFE Steel Corporation-Research and Development, Japan. 6 pp.  
<http://www.ife-steel.co.jp/en/research/report/003/05.html>

- 
35. **Juniper (2001)**. *Pyrolysis & Gasification of Waste – A Worldwide Technology & Business Review*, 2nd Edition, October 2001, Juniper Consultancy Services, Limited, UK
36. **Klein Alexander (2002)**. *Gasification: An alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid wastes*. Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University. May 2002. <http://columbia.edu/cu/earth>
37. **Krigmont H. (1999)**. "IGCC power generation concept: A gateway for a cleaner future. Allied Environmental Technologies". White paper.  
<http://www.alentecinc.com/papers/IGCC/ADVGASIFICATION.pdf>
38. **Kumar S. (2000)**. *Technology options for municipal solid waste-to-energy project*. TIMES (TERI Information Monitor on Environmental Science). Volume 5, Number 1 (June 2000). 1-11 pp.
39. **Lee G. Fred, Jones-Lee Anne (2003)**. Closed landfill cover space reuse: park, golf course or a tomb?. G. Fred Lee & Associates. El Macero, California.  
[http://www.gfredlee.com/lf\\_reuse.htm](http://www.gfredlee.com/lf_reuse.htm)
40. **Leidner Jacob (1981)**. *Plastics Waste, Recovery of Economic Value*. Marcel Dekker, Inc. (edit.). USA, 1981. 317 p.
41. **McKone T. H. and Hammond S. K., (2000)**. Managing the health of impacts of waste incineration. Environmental Science & Technology. Septiembre 1, 2000. p.p. 380A-386A
42. **Miranda and Hale (1999)**. "Re-covering all the bases: A comparison of landfills and resource recovery facilities in Puerto Rico". Nickolas Scholl of the Environment, Duke University.
43. **Muñoz Sánchez, A. (1980)**. Residuos sólidos plásticos, tratamiento y reciclado. Centro Internacional de Formación de Ciencias Ambientales (CIFCA). Madrid. 77 pp.

- 
44. **NOM-083-ECOL-1996**. *Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales*. Diario Oficial de la Federación 25 de noviembre de 1996.
45. **OECD (1999)**. *Strategic Waste Prevention. Core Messages from the OECD Reference Manual*. The OECD Environment Programme. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris, 1999
46. **Pellaumail, Karine (2001)**. *Waste Management methods*. Friends of the Earth. <http://www.foe.co.uk>. Last modified: 24 April 2001. (consultada en enero 2004)
47. **Reynolds A., LeGoy Ph., Sweeney A. (2002)**. *Waste to energy strategy and approach for Ireland.. 10<sup>th</sup> Annual North American Waste to Energy Conference Refractory*. May 2002. Pennsylvania. USA. Report NAWTEC10-1009  
<http://store.asme.org/product.asp?catalog%5Fname=COonference+Papers&category%5F>
48. **Risse Mark & Faucette Britt (2000)**. "*Food waste composting, industrial and industrial applications*". Cooperative extension service. The University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences.
49. **Rosiles G. (1999)**. *Manejo de los residuos sólidos en México*. En: Memorias del Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Residuos Sólidos. SUSTENTA/Semarnap-INE
50. **Sancho y Cervera J. y G Rosiles G. (1999)**. *Situación Actual del Manejo de los Residuos Sólidos en México*. Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). México
51. **Scottish Agricultural Web Site (2002)**.  
<http://www.sac.ac.uk/envsci/External/WillowPower/Conversn.htm>
52. **SEDUE (1988)**. *Políticas y estrategias en el manejo de los residuos municipales e industriales en México*. México

- 
53. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-15-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Método de cuarteo. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
54. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-16-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de humedad. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
55. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-19-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso volumétrico "in situ". Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
56. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-22-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y cuantificación de subproductos. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
57. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-33-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Poder Calorífico Superior. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
58. **SECOFI (1985)**. *Norma Mexicana, NMX-AA-52-1985*. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
59. **SEMARNAT (1999)**. *Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos*. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. Primera edición. México, 1999. 235 p.
60. **Severini Pamela (1995)**. *La gestión de la basura en las grandes ciudades*. Publicación del Centro de Investigación sobre América del Norte (CISAN - UNAM). México, 1995. 62 p.
61. **Snigdha Chakrabarti (2003)**. *Economics of Solid Waste Management: A Survey of Existing Literatura*. Economic Research Unit, Indian Statistical Institute. 58 pp.

- 
62. **Tchobanoglous, G., Theisen H., Vigil S. (1993).** *Gestión integral de residuos sólidos.* McGraw-Hill. Volumen I y II. España, 1993. 1107 p.
63. **Tejdar Farouk (1999).** *Sensors and emissions control in waste treatment installations.* Sensors and Actuators B Chemical. 59 (1999) 75-77.
64. **Urquiza (1969).** *Fisicoquímica experimental.* Editorial Limusa. México. 139 p.
65. **UNEP (2003).** Intergovernmental Negotiating Committee for an International Legally Binding Instrument for Implementing International Action on Certain Persistent Organic Pollutants.  
Seventh session Geneva, 14-18 July 2003. UNEP/POPS/INC.7/INF 17. 151 pp.  
[http://www.pops.int/documents/meetings/inc7/inf/en/7\\_inf\\_17.pdf](http://www.pops.int/documents/meetings/inc7/inf/en/7_inf_17.pdf)
66. **US-EPA (1997).** *Summaries of Related Solid Waste Incineration Rules. Final rule published December 19, 1995; amended August 25, 1997.* Office of Air & Radiation. United States-Environmental Protection Agency.  
<http://www.epa.gov/oar/oaqps/takingtoxics/p3.html>
67. **US-EPA (2003).** *Municipal solid waste in the United States: 2001 Facts and Figures.* Office of Solid Waste and Emergency Response. United States-Environmental Protection Agency. EPA530-S-03-011. October, 2003. 16 p.
68. **Zerbock, Olar (2003).** *Urban Solid Waste Management: Waste reduction in developing nations.* Michigan Technological University. 23 pp.  
[http://www.cee.mtu.edu/peacecorps/documents\\_july03/Waste\\_reduction\\_and\\_incineration\\_FINAL.pdf](http://www.cee.mtu.edu/peacecorps/documents_july03/Waste_reduction_and_incineration_FINAL.pdf)

**Páginas con información general consultadas en la WWW:**

<http://www.caddet.org> Center for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies

<http://www.energ.co.uk> Ener-G Combined Power Ltd. Reino Unido

<http://www.env.go.jp> Ministry of the Environment. Japan

<http://www.environment-agency.gov.uk> Environment Agency. United Kingdom

<http://www.epa.gov> United States Environmental Protection Agency. EEUA

<http://www.defra.gov.uk> Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA)

<http://www.iea.org> International Energy Agency

<http://www.juniper.co.uk> Juniper Consultants Ltd.

[http://www.plasticsresource.com/s\\_plasticsresource/index.asp](http://www.plasticsresource.com/s_plasticsresource/index.asp) The American Plastics Council. EEUA

<http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/> Waste-To-Energy Research and Technology Council. EEUA

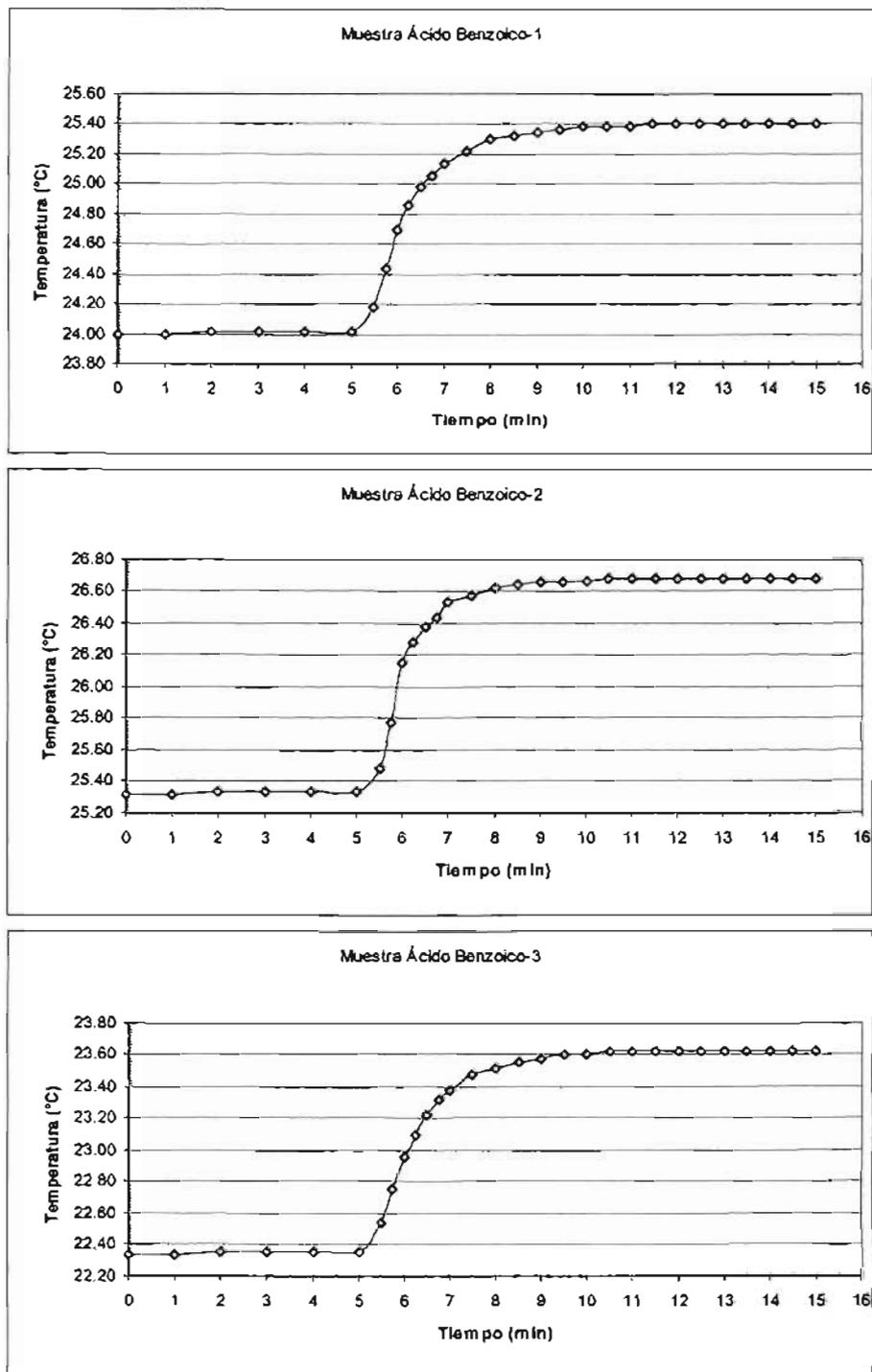
<http://www.swana.org/> Solid Waste Association of North America. EEUA

## APÉNDICE I. DETERMINACIÓN DE PODER CALORÍFICO

Cuadro A.1 Datos de la temperatura vs tiempo. Calibración del calorímetro Parr 1341

Tiempo (min)	Muestra Ácido Benzoico-1	Muestra Ácido Benzoico-2	Muestra Ácido Benzoico-3
0	24.00	25.32	22.34
1	24.00	25.32	22.34
2	24.02	25.34	22.36
3	24.02	25.34	22.36
4	24.02	25.34	22.36
5	24.02	25.34	22.36
5.5	24.18	25.48	22.54
6	24.70	26.16	22.96
6.25	24.86	26.28	23.10
6.5	24.98	26.38	23.22
7	25.14	26.54	23.38
7.5	25.22	26.58	23.48
8	25.30	26.62	23.52
8.5	25.32	26.64	23.56
9	25.34	26.66	23.58
9.5	25.36	26.66	23.60
10	25.38	26.66	23.60
10.5	25.38	26.68	23.62
11	25.38	26.68	23.62
11.5	25.40	26.68	23.62
12	25.40	26.68	23.62
12.5	25.40	26.68	23.62
13	25.40	26.68	23.62
13.5	25.40	26.68	23.62
14	25.40	26.68	23.62
14.5	25.40	26.68	23.62
15	25.40	26.68	23.62

Figura A.1. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Calibración del calorímetro



Cuadro A.2. Datos y resultados obtenidos. Calibración del equipo Parr 1341

<b>Ácido Benzoico-1 (Calibración 1 de 3)</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>H</i> (constante)	
Calor de combustión del alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Poder de Comb. Ac. Benz. [cal/g]	<b>6318</b>
<i>G</i>		Temp. Inicial [°C]	22.94
Peso Ac. Benz. 1 [g]	<b>1.0788</b>	Temp. Final [°C]	25.76
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.82</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del ácido nítrico [cal]	<b>10.68</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>18.86</b>
$L_{inicial}$ alambre [cm]	10.0		
$L_{final}$ alambre [cm]	1.8	<i>W</i> 1 [cal/°C]	<b>2427</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>8.2</b>		
<b>Ácido Benzoico-2 (Calibración 2 de 3)</b>			
<i>G</i>		Temp. Inicial [°C]	23.24
Peso Ac. Benz. 2 [g]	<b>1.0231</b>	Temp. Final [°C]	25.94
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.70</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del ácido nítrico [cal]	<b>12</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>11.37</b>
$L_{inicial}$ alambre [cm]	10.0		
$L_{final}$ alambre [cm]	2.3	<i>W</i> 2 [cal/°C]	<b>2405</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.7</b>		
<b>Ácido Benzoico-3 (Calibración 3 de 3)</b>			
<i>G</i>		Temp. Inicial [°C]	25.00
Peso Ac. Benz. 3 [g]	<b>1.1676</b>	Temp. Final [°C]	28.02
		$\Delta T$ [°C]	<b>3.02</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del ácido nítrico [cal]	<b>11.37</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>17.48</b>
$L_{inicial}$ alambre [cm]	10		
$L_{final}$ alambre [cm]	2.4	<i>W</i> 3 [cal/°C]	<b>2452</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.6</b>		

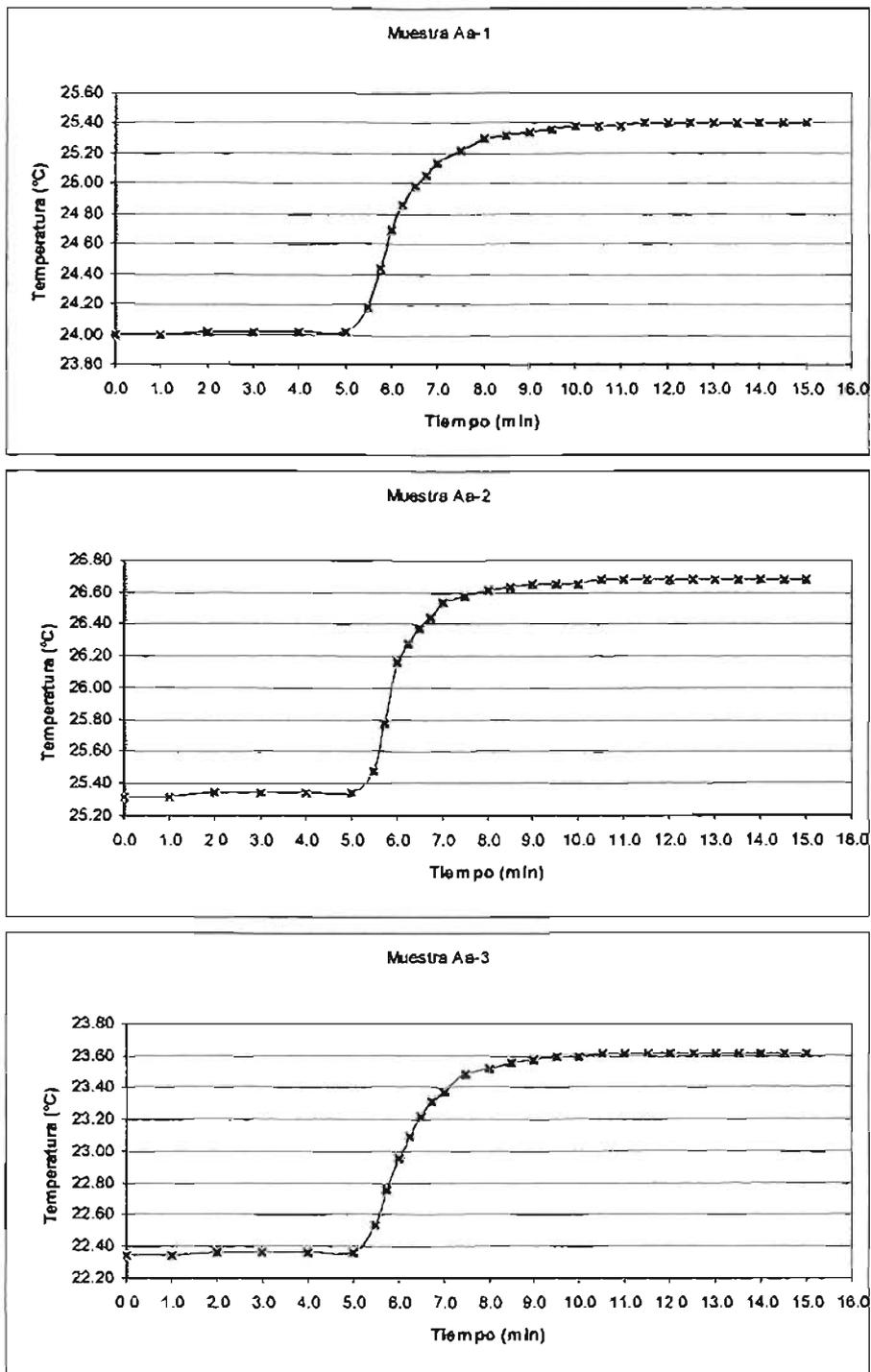
## ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES

### Sitio A – Estrato socioeconómico alto (Aa)

Cuadro A.3. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Aa

Tiempo (min)	Muestra Aa-1	Muestra Aa-2	Muestra Aa-3
0.0	24.00	25.32	22.34
1.0	24.00	25.32	22.34
2.0	24.02	25.34	22.36
3.0	24.02	25.34	22.36
4.0	24.02	25.34	22.36
5.0	24.02	25.34	22.36
5.5	24.18	25.48	22.54
5.8	24.44	25.78	22.76
6.0	24.70	26.16	22.96
6.3	24.86	26.28	23.10
6.5	24.98	26.38	23.22
6.8	25.06	26.44	23.32
7.0	25.14	26.54	23.38
7.5	25.22	26.58	23.48
8.0	25.30	26.62	23.52
8.5	25.32	26.64	23.56
9.0	25.34	26.66	23.58
9.5	25.36	26.66	23.60
10.0	25.38	26.66	23.60
10.5	25.38	26.68	23.62
11.0	25.38	26.68	23.62
11.5	25.40	26.68	23.62
12.0	25.40	26.68	23.62
12.5	25.40	26.68	23.62
13.0	25.40	26.68	23.62
13.5	25.40	26.68	23.62
14.0	25.40	26.68	23.62
14.5	25.40	26.68	23.62
15.0	25.40	26.68	23.62

Figura A.2. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Aa



Cuadro A.4. Datos y resultados obtenidos. Muestra Aa

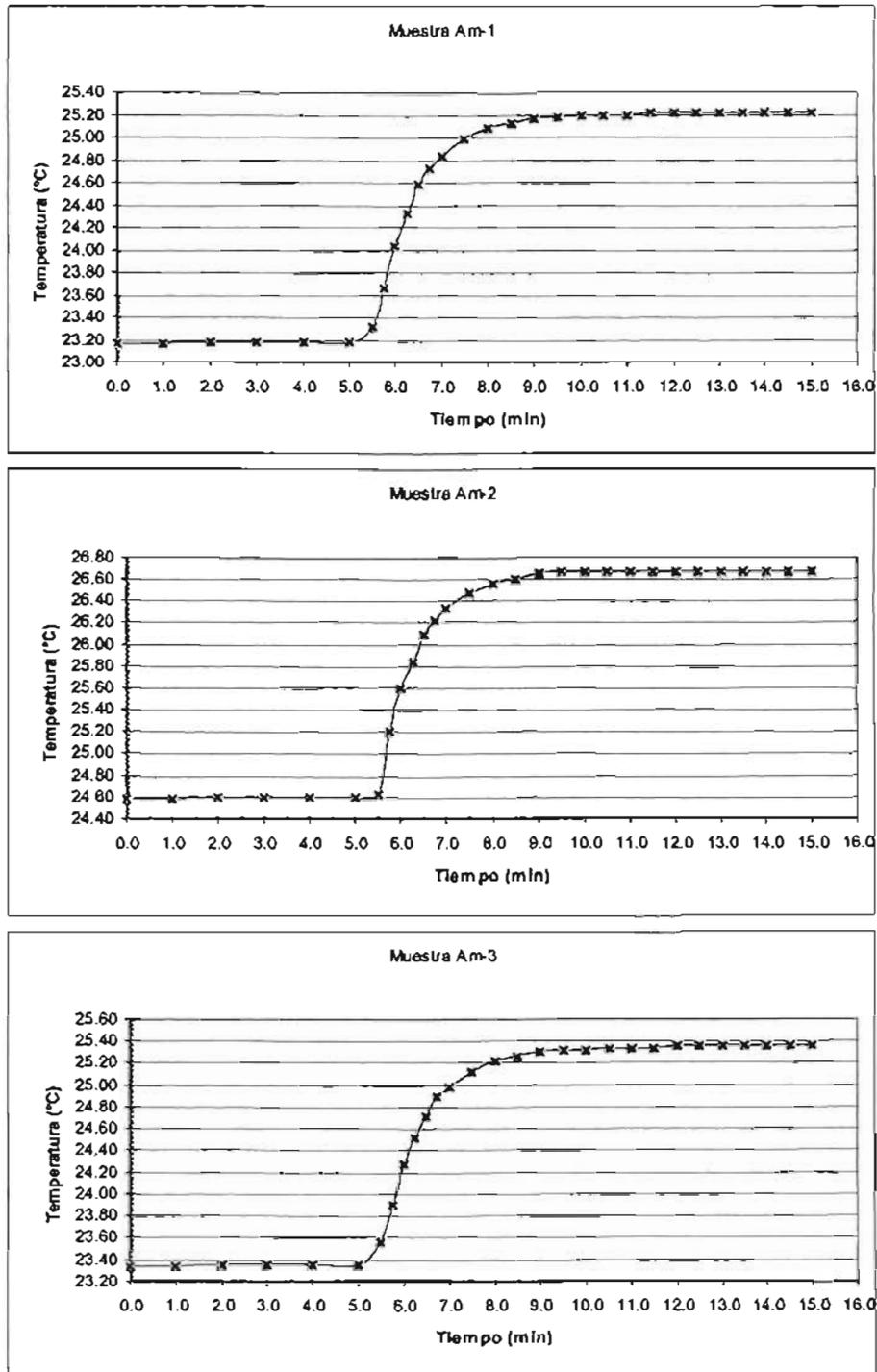
Repetición 1 de 3			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	24.02
Peso Muestra Aa-1 [g]	<b>0.6222</b>	Temp. Final [°C]	25.40
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.38</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>1.17</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>17.25</b>
Linicial alambre [cm]	10		
Lfinal alambre [cm]	2.5	<b>PCS Aa-1 [cal/g]</b>	<b>5353</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.5</b>		
Repetición 2 de 3			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	25.34
Peso Muestra Aa-2 (g)	<b>0.6065</b>	Temp. Final [°C]	26.68
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.34</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>1.83</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>15.18</b>
Linicial alambre [cm]	10		
Lfinal alambre [cm]	3.4	<b>PCS (Aa-2) [cal/g]</b>	<b>5334</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.6</b>		
Repetición 3 de 3			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	22.36
Peso Muestra Aa-3 (g)	<b>0.5904</b>	Temp. Final [°C]	23.62
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.26</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>1.42</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>11.5</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	5.0	<b>PCS (Aa-3) [cal/g]</b>	<b>5158</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>5.0</b>		

## Sitio A – Estrato socioeconómico medio (Am)

Cuadro A.5. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Am

Tiempo (min)	Muestra Am-1	Muestra Am-2	Muestra Am-3
0.0	23.16	24.58	23.34
1.0	23.16	24.58	23.34
2.0	23.18	24.60	23.36
3.0	23.18	24.60	23.36
4.0	23.18	24.60	23.36
5.0	23.18	24.60	23.36
5.5	23.32	24.62	23.56
5.8	23.66	25.20	23.90
6.0	24.04	25.60	24.28
6.3	24.32	25.84	24.52
6.5	24.58	26.10	24.72
6.8	24.72	26.22	24.90
7.0	24.84	26.34	24.98
7.5	24.98	26.48	25.12
8.0	25.08	26.56	25.22
8.5	25.12	26.60	25.26
9.0	25.16	26.66	25.30
9.5	25.18	26.68	25.32
10.0	25.20	26.68	25.32
10.5	25.20	26.68	25.34
11.0	25.20	26.68	25.34
11.5	25.22	26.68	25.34
12.0	25.22	26.68	25.36
12.5	25.22	26.68	25.36
13.0	25.22	26.68	25.36
13.5	25.22	26.68	25.36
14.0	25.22	26.68	25.36
14.5	25.22	26.68	25.36
15.0	25.22	26.68	25.36

Figura A.3. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Am



Cuadro A.6. Datos y resultados obtenidos. Muestra Am

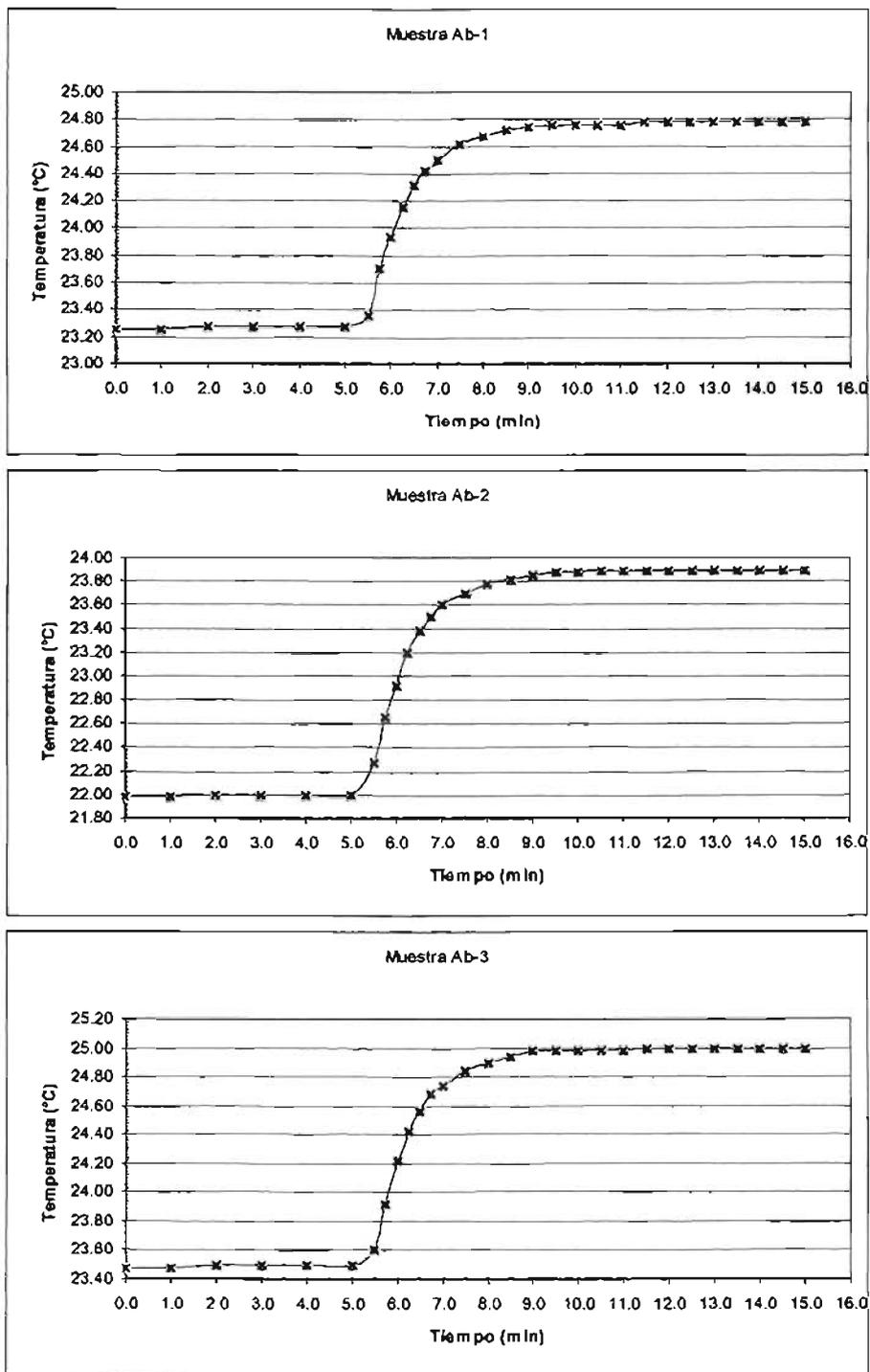
<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.18
Peso Muestra Am-1 [g]	<b>0.8849</b>	Temp. Final [°C]	25.22
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.04</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>5.13</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>14.95</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.5	<b>PCS Am-1 [cal/g]</b>	<b>5572</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.5</b>		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	24.60
Peso Muestra Am-2 (g)	<b>0.9265</b>	Temp. Final [°C]	26.68
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.08</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>3.75</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>17.94</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	2.2	<b>PCS (Am-2) [cal/g]</b>	<b>5425</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.8</b>		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.36
Peso Muestra Am-3 (g)	<b>0.8736</b>	Temp. Final [°C]	25.36
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.00</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>2.66</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>17.94</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	2.2	<b>PCS (Am-3) [cal/g]</b>	<b>5533</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.8</b>		

## Sitio A – Estrato socioeconómico bajo (Ab)

Cuadro A.7. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Ab

Tiempo (min)	Muestra Ab-1	Muestra Ab-2	Muestra Ab-3
0.0	23.26	21.98	23.48
1.0	23.26	21.98	23.48
2.0	23.28	22.00	23.50
3.0	23.28	22.00	23.50
4.0	23.28	22.00	23.50
5.0	23.28	22.00	23.50
5.5	23.36	22.28	23.60
5.8	23.70	22.66	23.92
6.0	23.94	22.92	24.22
6.3	24.16	23.20	24.42
6.5	24.32	23.38	24.56
6.8	24.42	23.50	24.68
7.0	24.50	23.60	24.74
7.5	24.62	23.70	24.84
8.0	24.68	23.78	24.90
8.5	24.72	23.82	24.94
9.0	24.74	23.86	24.98
9.5	24.76	23.88	24.98
10.0	24.76	23.88	24.98
10.5	24.76	23.90	24.98
11.0	24.76	23.90	24.98
11.5	24.78	23.90	25.00
12.0	24.78	23.90	25.00
12.5	24.78	23.90	25.00
13.0	24.78	23.90	25.00
13.5	24.78	23.90	25.00
14.0	24.78	23.90	25.00
14.5	24.78	23.90	25.00
15.0	24.78	23.90	25.00

Figura A.4. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Ab



Cuadro A.8. Datos y resultados obtenidos. Muestra Ab

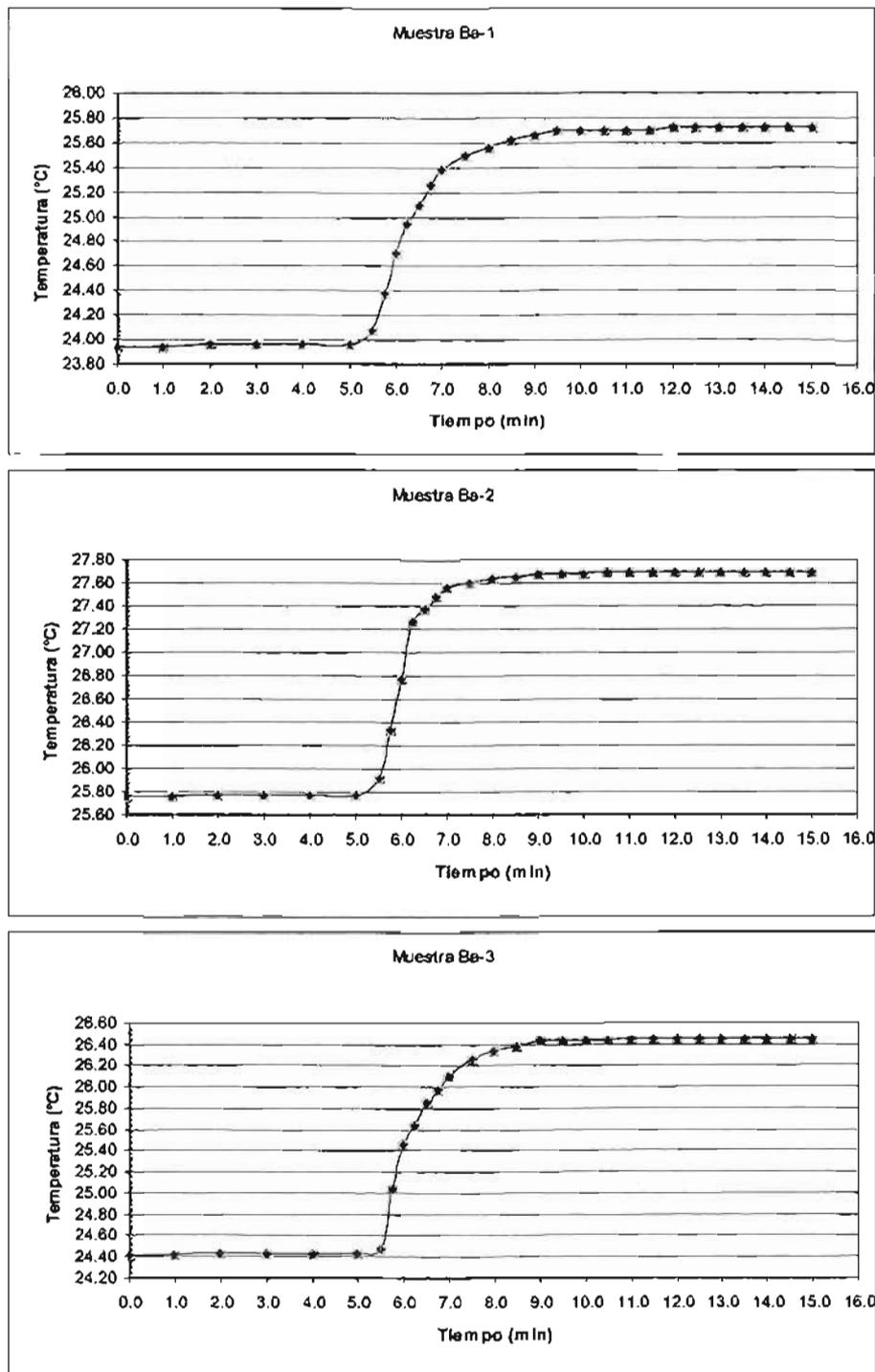
<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.28
Peso Muestra Ab-1 [g]	<b>0.6677</b>	Temp. Final [°C]	24.78
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.50</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>6.18</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>14.72</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.6	<b>PCS Ab-1 [cal/g]</b>	<b>5421</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.4</b>		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	22.00
Peso Muestra Ab-2 (g)	<b>0.8065</b>	Temp. Final [°C]	23.90
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.90</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]		Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>11.5</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	5	<b>PCS (Ab-2) [cal/g]</b>	<b>5695</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>5</b>		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.50
Peso Muestra Ab-3 (g)	<b>0.6844</b>	Temp. Final [°C]	25.00
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.5</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>6.0</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>16.33</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	2.9	<b>PCS (Ab-3) [cal/g]</b>	<b>5287</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>7.1</b>		

**Sitio B – Estrato socioeconómico alto (Ba)**

**Cuadro A.9. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Ba**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Muestra Ba-1</b>	<b>Muestra Ba-2</b>	<b>Muestra Ba-3</b>
0.0	23.94	25.76	24.42
1.0	23.94	25.76	24.42
2.0	23.96	25.78	24.44
3.0	23.96	25.78	24.44
4.0	23.96	25.78	24.44
5.0	23.96	25.78	24.44
5.5	24.08	25.92	24.48
5.8	24.38	26.34	25.04
6.0	24.70	26.77	25.46
6.3	24.94	27.26	25.64
6.5	25.10	27.38	25.86
6.8	25.26	27.48	25.98
7.0	25.38	27.56	26.10
7.5	25.50	27.60	26.26
8.0	25.56	27.64	26.34
8.5	25.62	27.66	26.38
9.0	25.66	27.68	26.44
9.5	25.70	27.68	26.44
10.0	25.70	27.68	26.44
10.5	25.70	27.70	26.44
11.0	25.70	27.70	26.46
11.5	25.70	27.70	26.46
12.0	25.72	27.70	26.46
12.5	25.72	27.70	26.46
13.0	25.72	27.70	26.46
13.5	25.72	27.70	26.46
14.0	25.72	27.70	26.46
14.5	25.72	27.70	26.46
15.0	25.72	27.70	26.46

Figura A.5. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Ba



Cuadro A.10. Datos y resultados obtenidos. Muestra Ba

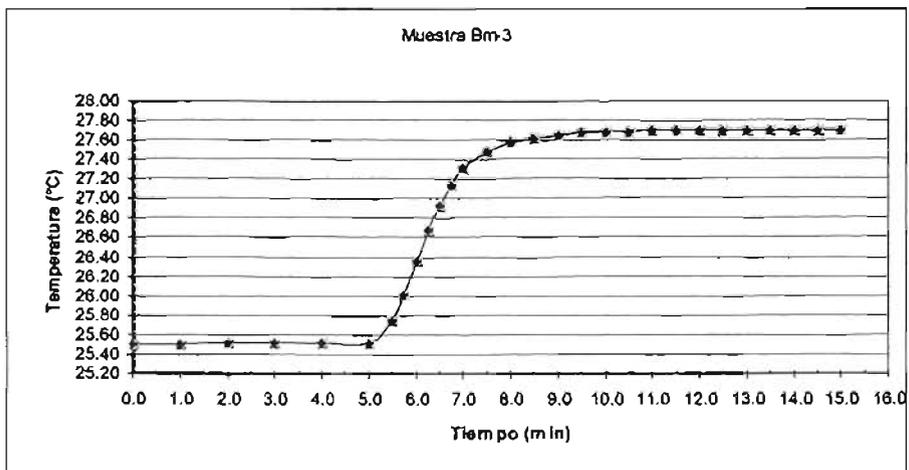
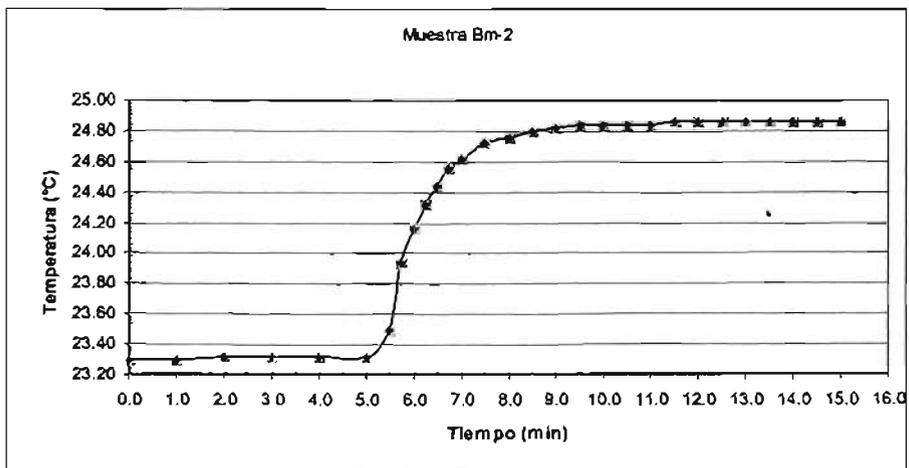
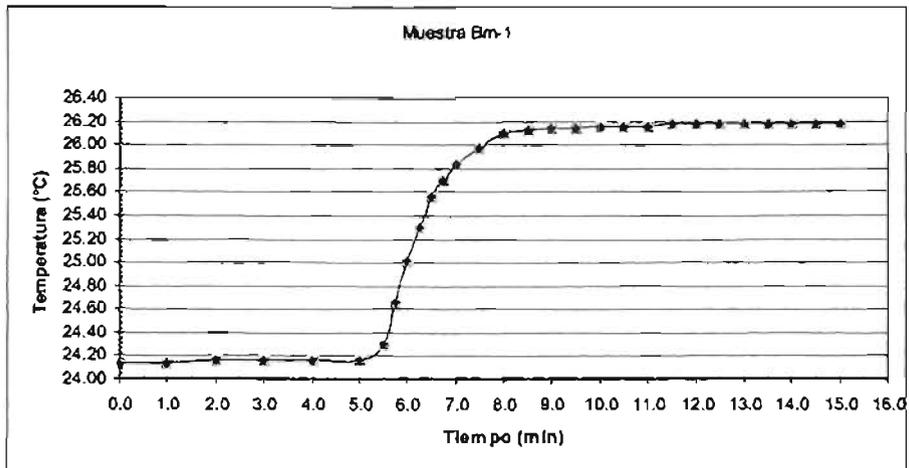
<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	2.3	Eq. energético del equipo [cal/g]	2427
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.96
Peso Muestra Ba-1 (g)	0.6982	Temp. Final [°C]	25.72
		$\Delta T$ [°C]	1.76
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	1.64	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	12.65
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	4.5	<b>PCS Ba-1 [cal/g]</b>	<b>6097</b>
<i>C3</i> [cm]	5.5		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	25.78
Peso Muestra Ba-2 (g)	0.7649	Temp. Final [°C]	27.70
		$\Delta T$ [°C]	1.92
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	2.45	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	9.2
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	6.0	<b>PCS (Ba-2) [cal/g]</b>	<b>6077</b>
<i>C3</i> [cm]	4.0		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	24.44
Peso Muestra Ba-3 (g)	0.8539	Temp. Final [°C]	26.45
		$\Delta T$ [°C]	2.01
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	1.86	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	13.8
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	4.0	<b>PCS (Ba-3) [cal/g]</b>	<b>5695</b>
<i>C3</i> [cm]	6.0		

## Sitio B – Estrato socioeconómico medio (Bm)

Cuadro A.11. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Bm

Tiempo (min)	Muestra Bm-1	Muestra Bm-2	Muestra Bm-3
0.0	24.14	23.30	25.50
1.0	24.14	23.30	25.50
2.0	24.16	23.32	25.52
3.0	24.16	23.32	25.52
4.0	24.16	23.32	25.52
5.0	24.16	23.32	25.52
5.5	24.30	23.50	25.74
5.8	24.66	23.94	26.02
6.0	25.02	24.16	26.36
6.3	25.30	24.32	26.68
6.5	25.56	24.44	26.92
6.8	25.70	24.56	27.14
7.0	25.84	24.62	27.32
7.5	25.98	24.72	27.48
8.0	26.10	24.76	27.58
8.5	26.12	24.80	27.62
9.0	26.14	24.82	27.66
9.5	26.14	24.84	27.68
10.0	26.16	24.84	27.68
10.5	26.16	24.84	27.68
11.0	26.16	24.84	27.70
11.5	26.16	24.86	27.70
12.0	26.16	24.86	27.70
12.5	26.18	24.86	27.70
13.0	26.18	24.86	27.72
13.5	26.18	24.86	27.72
14.0	26.18	24.86	27.72
14.5	26.18	24.86	27.72
15.0	26.18	24.86	27.72

Figura A.6. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Bm



Cuadro A.12. Datos y resultados obtenidos. Muestra Bm

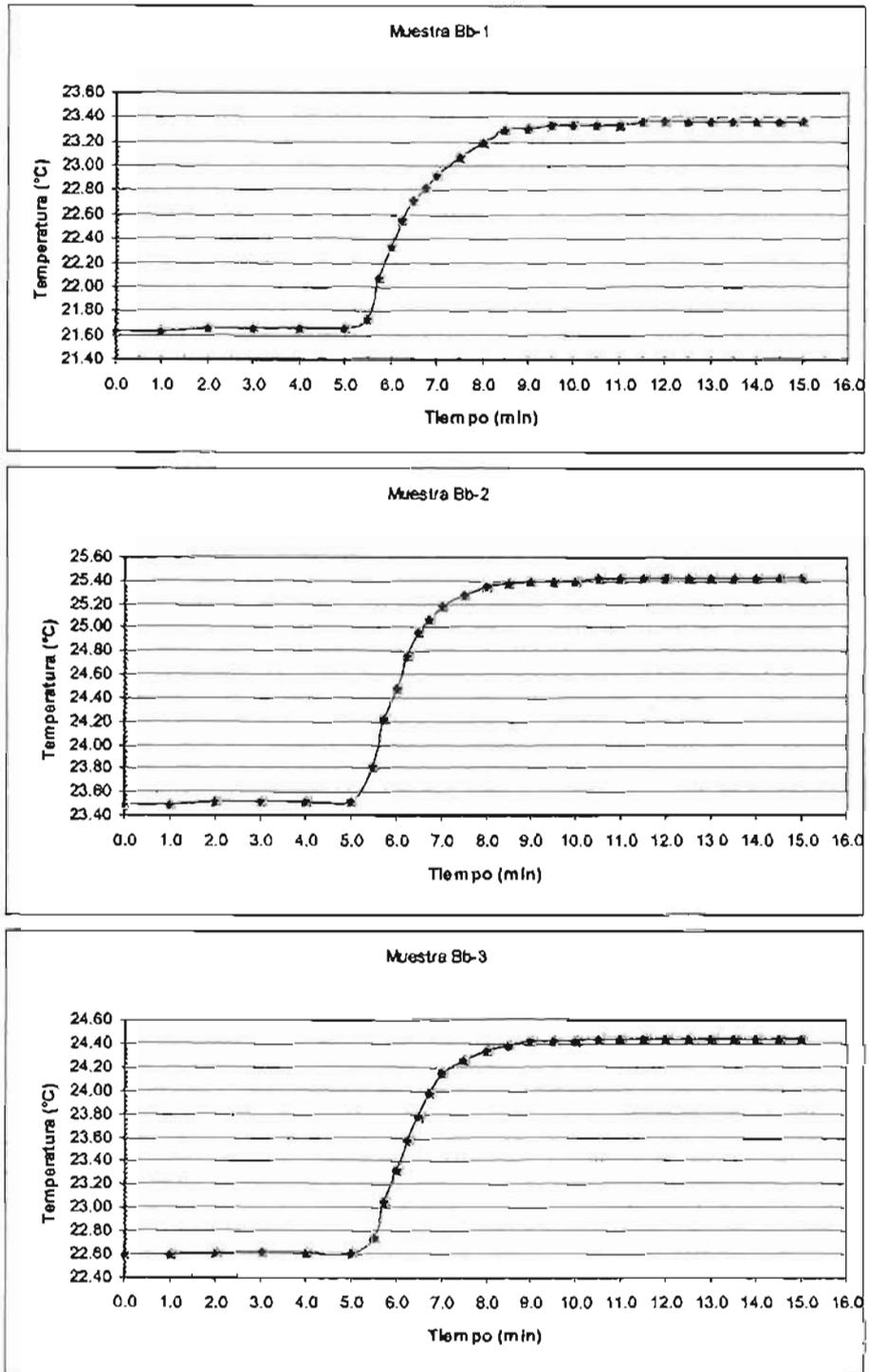
<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	24.16
Peso Muestra Bm-1 (g)	<b>0.8542</b>	Temp. Final [°C]	26.18
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.02</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>4.23</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>13.11</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	4.3	<b>PCS Bm-1 [cal/g]</b>	<b>5719</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>5.7</b>		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.32
Peso Muestra Bm-2 (g)	<b>0.6539</b>	Temp. Final [°C]	24.86
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.54</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>5.25</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>19.55</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	1.5	<b>PCS (Bm-2) [cal/g]</b>	<b>5678</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>8.5</b>		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	25.52
Peso Muestra Bm-3 (g)	<b>0.8956</b>	Temp. Final [°C]	27.72
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.20</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>4.62</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>18.4</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	2.0	<b>PCS (Bm-3) [cal/g]</b>	<b>5936</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>8.0</b>		

### Sitio B – Estrato socioeconómico bajo (Bb)

Cuadro A.13. Datos de la temperatura vs tiempo. Muestra Bb

Tiempo (min)	Muestra Bb-1	Muestra Bb-2	Muestra Bb-3
0.0	21.64	23.50	22.60
1.0	21.64	23.50	22.60
2.0	21.66	23.52	22.62
3.0	21.66	23.52	22.62
4.0	21.66	23.52	22.62
5.0	21.66	23.52	22.62
5.5	21.74	23.82	22.74
5.8	22.08	24.22	23.06
6.0	22.34	24.48	23.32
6.3	22.56	24.76	23.58
6.5	22.72	24.96	23.78
6.8	22.82	25.08	23.98
7.0	22.92	25.18	24.16
7.5	23.08	25.28	24.26
8.0	23.20	25.36	24.34
8.5	23.30	25.38	24.38
9.0	23.32	25.40	24.42
9.5	23.34	25.40	24.42
10.0	23.34	25.40	24.42
10.5	23.34	25.42	24.44
11.0	23.34	25.42	24.44
11.5	23.36	25.42	24.44
12.0	23.36	25.42	24.44
12.5	23.36	25.42	24.44
13.0	23.36	25.42	24.44
13.5	23.36	25.42	24.44
14.0	23.36	25.42	24.44
14.5	23.36	25.42	24.44
15.0	23.36	25.42	24.44

Figura A.7. Graficas del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo. Muestra Bb



Cuadro A.14. Datos y resultados obtenidos. Muestra Bb

<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	21.66
Peso Muestra Bb-1 [g]	<b>0.7325</b>	Temp. Final [°C]	23.36
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.7</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>5.66</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>11.04</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	5.2	<b>PCS Bb-1 [cal/g]</b>	<b>5610</b>
C3 [cm]	<b>4.8</b>		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	23.52
Peso Muestra Bb-2 (g)	<b>0.9155</b>	Temp. Final [°C]	25.42
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.9</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>7.24</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>11.96</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	4.8	<b>PCS (Bb-2) [cal/g]</b>	<b>5016</b>
C3 [cm]	<b>5.2</b>		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	22.62
Peso Muestra Bb-3 (g)	<b>0.8632</b>	Temp. Final [°C]	24.44
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.82</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	<b>7.26</b>	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>15.18</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.4	<b>PCS (Bb-3) [cal/g]</b>	<b>5091</b>
C3 [cm]	<b>6.6</b>		

**Sitio C – Estación del Metro-STC (MG)**  
**Cuadro A.15. Datos y resultados obtenidos. Muestra MG**

<b>Repetición 1 de 3</b>			
<i>K</i> (constante)		<i>W</i> (constante)	
Calor de comb. alambre [cal/g]	<b>2.3</b>	Eq. energético del equipo [cal/g]	<b>2427</b>
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	25.52
Peso Muestra <b>MG-1</b> [g]	<b>0.9545</b>	Temp. Final [°C]	27.90
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.38</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	-	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>15.41</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.3	<b>PCS MG-1</b> [cal/g]	<b>6035</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.7</b>		
<b>Repetición 2 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	27.12
Peso Muestra <b>MG-2</b> (g)	<b>0.5310</b>	Temp. Final [°C]	28.40
		$\Delta T$ [°C]	<b>1.28</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	-	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>14.49</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.7	<b>PCS (MG-2)</b> [cal/g]	<b>5823</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.3</b>		
<b>Repetición 3 de 3</b>			
<i>m</i>		Temp. Inicial [°C]	26.06
Peso Muestra <b>MG-3</b> (g)	<b>0.8420</b>	Temp. Final [°C]	28.16
		$\Delta T$ [°C]	<b>2.10</b>
<i>e1</i>		<i>e3</i>	
Corrección por el calor de formación del Ác. Nítrico [cal]	-	Corrección por el calor de combustión del alambre [cal]	<b>15.41</b>
Linicial alambre [cm]	10.0		
Lfinal alambre [cm]	3.3	<b>PCS (MG-3)</b> [cal/g]	<b>6035</b>
<i>C3</i> [cm]	<b>6.7</b>		

## APÉNDICE II. SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO

### SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS. SITIO A

Cuadro A.16. Selección y cuantificación de subproductos, Sitio A

Id.	Subproducto	Peso (kg)	% en peso
1	Algodón	0.02	0.01
2	Cartón	9.80	7.67
5	Envase de cartón encerado	8.60	6.73
10	Lata	8.40	6.58
15	Material no ferroso	8.40	6.58
16	Papel	19.60	15.35
17	Pañal desechable	9.60	7.52
18	Plástico de película	13.60	10.65
19	Plástico rígido (PET)	12.40	9.71
22	Residuos de alimentos	13.80	10.81
23	Residuos de jardinería	13.00	10.18
24	Trapo	0.28	0.22
26	Vidrio transparente	10.20	7.99
<b>Total</b>		<b>127.70</b>	<b>100</b>

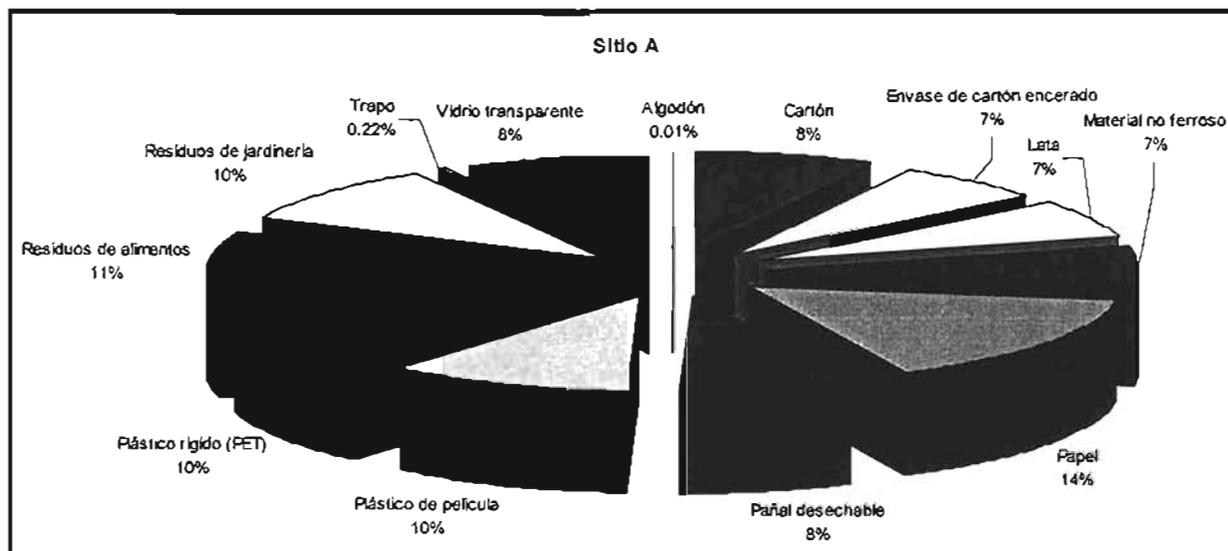


Figura A.8. Porcentaje de la selección y cuantificación de subproductos, Sitio A

SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS. SITIO B

Cuadro A.17. Selección y cuantificación de subproductos, Sitio B

Id	Subproductos	Peso (kg)	% en peso
1	Algodón	0.01	0.01
2	Cartón	9.40	8.99
4	Residuo fino (Criba M 2.0)	10.00	9.57
5	Envase de cartón encerado	8.80	8.42
10	Lata	8.60	8.23
12	Madera	13.40	12.82
15	Material no ferroso	0.08	0.08
17	Pañal desechable	9.20	8.80
18	Plástico de película	14.80	14.16
19	Plástico rígido (PET)	9.00	8.61
22	Residuos de alimentos	13.20	12.63
23	Residuos de jardinería	8.00	7.65
24	Trapo	0.03	0.03
<b>Total</b>		<b>104.52</b>	<b>100</b>

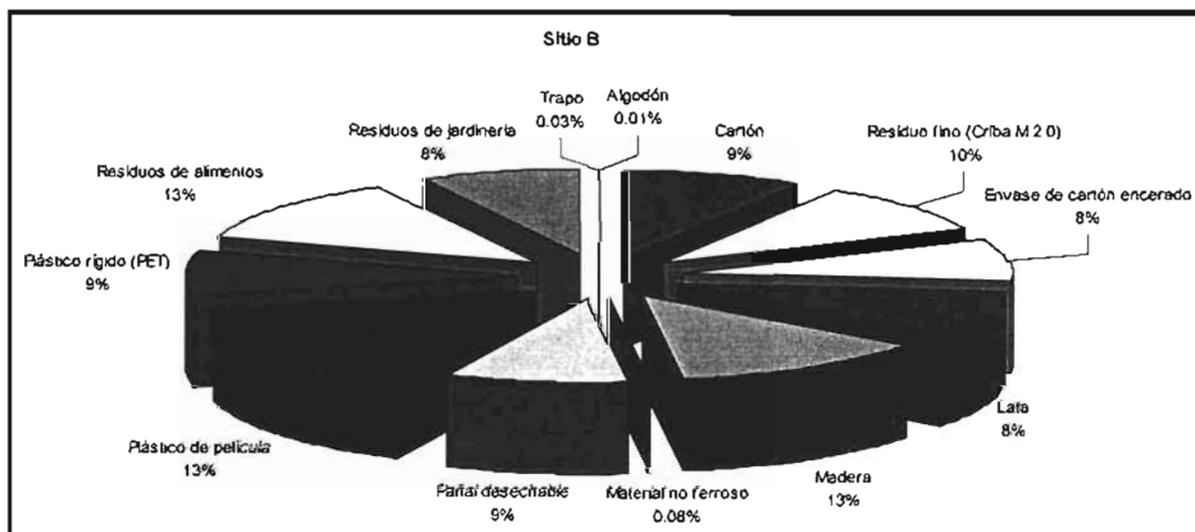
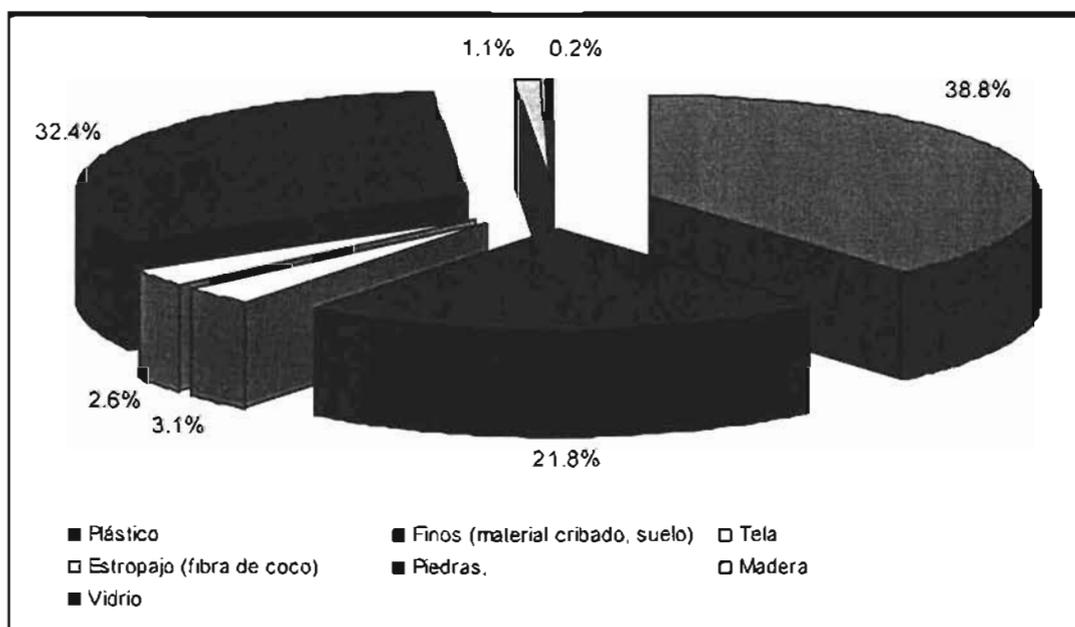


Figura A.9. Porcentaje de la selección y cuantificación de subproductos, Sitio B

Los valores de los Cuadros A.18 y A.19 corresponden a muestras tomadas de los desechos depositados en el Sitio B con una antigüedad aproximada de 9 años. Estos datos reflejan una composición de materiales plásticos mayor al 35%

**Cuadro A.18. Selección y cuantificación de subproductos, lugar de disposición final del Sitio B**

Material	Peso (kg)	% en peso
Plástico	45.5	38.82
Finos (material cribado, suelo)	25.6	21.84
Tela	3.6	3.07
Estropajo (fibra de coco)	3	2.56
Piedras (material inerte/construcción)	38	32.42
Madera	1.3	1.11
Vidrio	0.2	0.17
<b>TOTAL</b>	<b>117.2</b>	<b>100</b>



**Figura A.10. Composición de la muestra tomada en lugar de disposición final del Sitio B**

Cuadro A.19. Selección y cuantificación de subproductos, lugar de disposición final del Sitio B

Material	Peso (kg)	% en peso
Plástico	42	48.92
Finos (material cribado, suelo)	16.5	19.22
Tela	2.1	2.45
Estropajo (fibra de coco)	0.4	0.47
Piedras (material inerte/construcción)	24	27.96
Madera	0	0
Vidrio	0.85	0.99
<b>TOTAL</b>	<b>85.85</b>	<b>100</b>

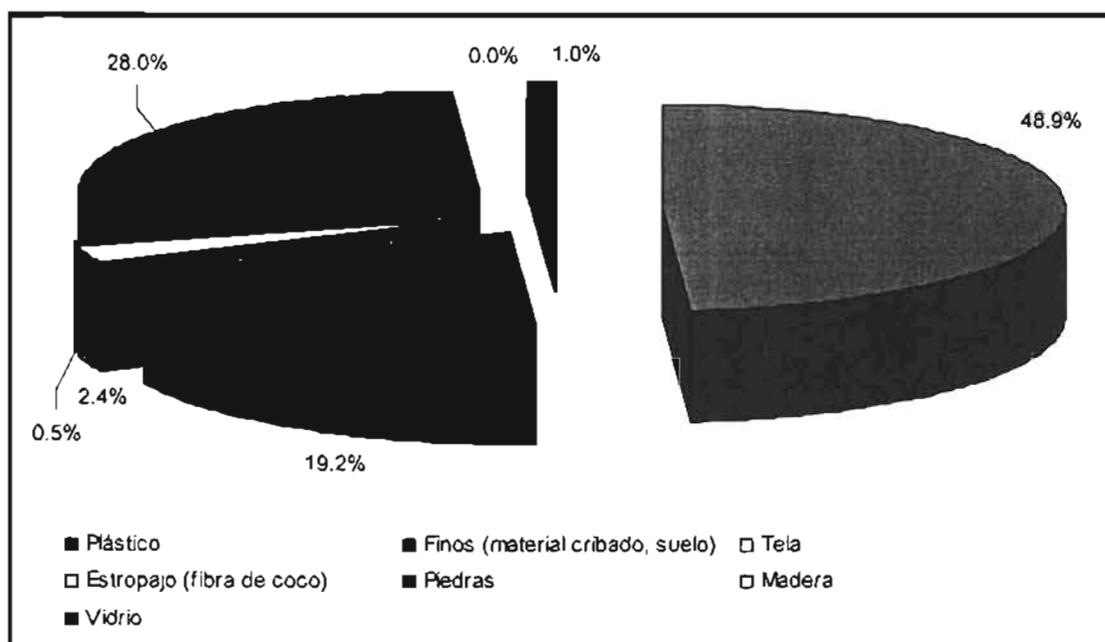


Figura A.11. Composición de la muestra tomada en lugar de disposición final del Sitio B

## DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO EN LOS SITIOS A Y B

### Sitio A

El rango del peso volumétrico<sup>55</sup> determinado a las muestras tomadas en el mes de septiembre en el Sitio A es de 185.31 a 216.30 kg/m<sup>3</sup>

### Sitio B

El rango del peso volumétrico determinado a las muestras tomadas en el mes de diciembre en el Sitio B es de 223.00 a 253.30 kg/m<sup>3</sup>

Debido a que el peso volumétrico de los desechos sólidos municipales varía notablemente con la ubicación geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenamiento, los valores típicos pueden ser muy variables. Los valores reportados corresponden únicamente a la época del año y circunstancias en que se realizó la toma de muestras y la determinación.

---

<sup>55</sup> Tchobanoglous (1993), reporta para desechos urbanos mezclados un peso volumétrico en el rango de 178 a 451 kg/m<sup>3</sup>, con un valor típico de 300 kg/m<sup>3</sup>.