



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
DEL DISTRITO FEDERAL MEDIANTE MUESTREO PARA SU
VALORIZACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL

T E S I S

P A R A O B T E N E R E L T Í T U L O D E :

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A :

M A N U E L D E J E S Ú S G A R C É S R O D R Í G U E Z

MÉXICO, D.F.

2010





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: Ing. José Antonio Ortiz Ramírez

VOCAL: Ing. Ramiro Eugenio Domínguez Danache

SECRETARIO: Dr. Alfonso Durán Moreno

1er SUPLENTE: Ing. José Agustín Texta Mena

2do SUPLENTE: Dr. José Agustín García Reynoso

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: 4º Piso, Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

ASESOR TÉCNICO:

M. I. Abril Moreno Gutiérrez

SUSTENTANTE:

Manuel de Jesús Garcés Rodríguez

Agradecimientos

A mis padres que han estado conmigo y me han apoyado a lo largo de mi vida y en especial en este trayecto; y sin su apoyo no hubiera podido lograrlo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindar el apoyo necesario para desarrollar el proyecto del cual ha formado parte mi tesis.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno quien ha compartido sus conocimientos, además de servir como guía para mi crecimiento profesional.

A mis sinodales por compartir conmigo su tiempo y conocimientos en el desarrollo de esta tesis.

A mí querida Universidad Nacional Autónoma de México en la que he pasado algunos de los mejores años de mi vida y me ha permitido desarrollarme.

A todos mis compañeros y amigos de la Torre de Ingeniería que trabajaron conmigo en el desarrollo de nuestro proyecto y aquellos que siempre me brindaron su apoyo: la Mtra. Abril Moreno, Adriana, Angie, Chío, Chucho, Iván, Jair, Jesús, Naye, Sam, Vianey, Victor y Viri.

Al I. Q. Juan Carlos Marín quien además de ser un gran amigo me ha apoyado con sus consejos y me ha dado un ejemplo a seguir.

A todos mis amigos de la Facultad que han estado conmigo en desvelos y festejos: Ayú, Isabel, Lalo, Lu, Mara, Norma y Raúl.

A todos aquellos que considero mis amigos y me han apoyado y motivado a seguir adelante.



Índice general

Introducción	i
Objetivos.....	iii
Justificación	iv
1. Marco Teórico y Antecedentes.....	1
1.1. Situación actual de los Residuos Sólidos Urbanos.....	2
1.1.1. Panorama Internacional de los Residuos Sólidos Urbanos ..	2
1.1.2. Panorama en México de los Residuos Sólidos Urbanos ...	4
1.1.3. Distrito Federal.....	6
1.1.3.1. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal.....	10
1.1.3.2. Estaciones de Transferencia.....	12
1.1.4. Legislación de Residuos Sólidos en México	16
1.2. Disposición Final de los Residuos Sólidos Urbanos	19
1.2.1. Relleno Sanitario	20
1.2.2. Tratamientos Térmicos	22
1.2.3. Incineración	22
1.2.4. Gasificación	25
1.2.5. Pirólisis	28
1.3. Muestreo y caracterización de residuos sólidos	32
1.3.1. Necesidades de caracterización	32
1.3.2. Estudios de caracterización de residuos sólidos urbanos.	33
1.3.3. Revisión de normatividad Nacional e Internacional	34
1.3.3.1. EUA.....	34
1.3.3.2. Unión Europea	37
1.3.3.3. México	40
1.3.4. Características a determinar.....	43



1.3.4.1. Composición de subproductos	43
1.3.4.2. Peso volumétrico	43
1.3.4.3. Análisis elemental	44
1.3.4.4. Humedad	44
1.3.4.5. Cenizas	44
1.3.4.6. Poder calorífico	45
1.3.5. Corriente de residuos a estudiar y lugar de muestreo ..	48
2. Metodología de Muestreo y caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal	50
2.1. Planeación	50
2.2. Muestreo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal en las 13 estaciones de transferencia	51
2.2.1. Determinación del tamaño de muestra	52
2.2.2. Toma de muestra	54
2.2.3. Homogenización	55
2.3. Caracterización de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal	55
2.3.1. Determinación de subproductos (composición)	55
2.3.2. Peso volumétrico	56
2.3.3. Análisis elemental	57
2.3.4. Humedad	57
2.3.5. Cenizas	57
2.3.6. Entalpía o calor de combustión (poder calorífico)	58
3. Resultados	60
3.1. Peso volumétrico	62
3.2. Composición	63
3.2.1. Subproductos	63
3.2.2. Elemental	69
3.2.3. Contenido de Humedad	70



3.2.4. Contenido de cenizas	73
3.3. Calor de combustión	74
4. Proyecciones de los Residuos Sólidos Urbanos en el D. F. de acuerdo a su composición	77
4.1. Cambios en la tasa de generación de RSU.....	77
4.2. Cambios en la separación de la fracción orgánica	80
4.3. Cambios en la tasa de reciclaje.....	82
5. Conclusiones.....	84
6. Referencias.....	87
7. Anexos.....	92
Anexo 1. Transferencia de residuos en el D. F.	92
Anexo 2. Procedimiento para la toma de muestra de RSU.....	93
Anexo 3. Método de Cuarteo.....	95
Anexo 4. Determinación de Peso Volumétrico en RSU.	97
Anexo 5. Determinación de Análisis Elemental.	100
Anexo 6. Determinación de subproductos.	102
Anexo 7. Determinación de Porcentaje Humedad en RSU	106
Anexo 8. Determinación de contenido de cenizas en RSU	110
Anexo 9. Determinación de Poder calorífico superior.	114



Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Composición de RSU en diferentes zonas del mundo (% másico).....	2
Tabla 1. 2 Generación per cápita en el mundo.....	4
Tabla 1. 3 Composición de los RSU en diferentes zonas del país (% másico)	5
Tabla 1. 4 Generación per cápita en América Latina.....	6
Tabla 1. 5 Generación de RSU en el D. F.	8
Tabla 1. 6 Recepción de RSU por ET.	15
Tabla 1. 7 Normatividad de Muestreo y Caracterización en la UE.	38
Tabla 1. 8 Normatividad mexicana relacionada al muestreo de RSU.	40
Tabla 3. 1 Condiciones termodinámicas ambientales durante el muestreo	61
Tabla 3. 2 Peso volumétrico de la fracción mezcla.	62
Tabla 3. 3 Composición de los RSU en el D. F.	64
Tabla 3. 4 Composición actual y último estudio elaborado.	67
Tabla 3. 5 Composición elemental, humedad y cenizas. (% másico)	69
Tabla 3. 6 Calor de combustión por ET (kJ/kg).....	75
Tabla 4. 1 Estimado de la generación de RSU en el D. F.	80



Índice de Figuras

Figura 1. 1 Diagrama de Flujo de RSU en el D. F.	10
Figura 1. 2 Distribución de las Estaciones de Transferencia....	12
Figura 1. 3 Mapa de la E. T. Álvaro Obregón.	13
Figura 1. 4 Diagrama de Planta Incineradora IVRY Paris XIII..	24
Figura 1. 5 Proceso de gasificación Thermoselect.	27
Figura 1. 6 Proceso de la tecnología Mitsui Recycling 21	31
Figura 2. 1 Metodología de planeación	50
Figura 2. 2 Termograma de una muestra de cartón	59



Índice de Gráficos

Gráfico 1. 1 Generación de RSU por delegación.	9
Gráfico 3. 1 Composición general de los RSU del D. F.	66
Gráfico 3. 2 Orgánicos e Inorgánicos presentes en la fracción mixta de los RSU en el D. F.	68
Gráfico 3. 3 Humedad por Estación de Transferencia.....	71
Gráfico 3. 4 Humedad en las fracciones orgánica e inorgánica de los RSU del D. F.	72
Gráfico 3. 5 Contenido de cenizas por Estación de Transferencia.....	73
Gráfico 3. 6 Termograma de combustión de ET Iztapalapa I. .	74
Gráfico 3. 7 Comparativo de valor de PC (kJ/kg)	76
Gráfico 4. 1 Crecimiento poblacional en el Distrito Federal.....	78
Gráfico 4. 2 Proyección de separación de residuos orgánicos..	81
Gráfico 4. 3 Fracciones de disposición final	82
Gráfico 4. 4 Composición futura de los RSU del D. F.	83



Introducción

La gestión de los residuos sólidos es una problemática que necesita pronta solución en el Distrito Federal. El principal problema es que el sistema de disposición final, el relleno sanitario ha alcanzado su capacidad máxima de diseño y con ello su tiempo de vida previsto, y es necesario buscar nuevas alternativas.

Existen diversas opciones de disposición final de residuos distintas al almacenamiento, tales como el reciclaje y la reutilización de ciertos materiales, o la obtención de energía eléctrica a través del uso de gases obtenidos mediante tratamientos de metanización de la fase orgánica o tratamientos térmicos de la fase inorgánica.

El uso de tratamientos térmicos como una opción de disposición final de residuos sólidos involucra tecnología avanzada e infraestructura detallada; de manera que los residuos deben ser considerados como una materia prima de los mismos y es de suma importancia conocer las características específicas de los residuos sólidos a ser sometidos a dichos tratamientos; además de que resulta de gran ayuda para mejorar la gestión de los residuos en el Distrito Federal.

En el Capítulo 1 se muestra la situación actual de los residuos tanto a nivel nacional como internacional y en específico del área de estudio: el Distrito Federal; las opciones de disposición final más comunes y su operación; además de una revisión bibliográfica de metodologías relacionadas y las necesidades de caracterización de residuos sólidos que produce una población determinada, los residuos sólidos urbanos (RSU). En el capítulo 2 se explica la metodología seguida para muestrear y caracterizar los residuos. El capítulo 3 comprende el reporte



de los resultados obtenidos e incluye su peso volumétrico (densidad), composición por subproductos, análisis elemental, contenido de humedad y cenizas, además de un análisis del comportamiento calorimétrico de los residuos sólidos en el Distrito Federal. Finalmente en el capítulo 4 se plantean proyecciones en cuanto a los residuos sólidos, su generación y su posible composición de acuerdo a su separación y reciclaje.

Se encontró que la composición de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal, en su mayor parte está constituida por residuos orgánicos, los cuales aportan la mayor cantidad del agua que contienen además de aumentar su peso por unidad de volumen. También fueron encontradas en proporción considerable fracciones de materiales reciclables o combustibles.

El comportamiento calorimétrico en los RSU del D. F. obtenido mostró un aporte de energía en dos etapas, la primera atribuible a materiales que contienen celulosa tales como papel y cartón, y la segunda a una temperatura más alta y que brinda un mayor aporte de energía atribuible a materiales plásticos.



Objetivos

Objetivo Principal

Caracterizar los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal con destino a disposición final a partir de un muestreo puntual en las 13 Estaciones de Transferencia del Distrito Federal, para fundamentar el planteamiento de una posible valorización térmica.

Objetivos Particulares

- Realizar un muestreo representativo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal en las 13 estaciones de transferencia y su posterior caracterización, de acuerdo a la normatividad existente.
- Realizar un estudio calorimétrico de los residuos sólidos urbanos para determinar su poder calorífico y describir su comportamiento térmico durante la combustión.
- Elaborar proyecciones de distintos escenarios de disponibilidad de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal, de acuerdo a su composición para su disposición final.



Justificación

La generación de residuos sólidos es resultado de las actividades humanas y presenta una tendencia creciente, su manejo constituye un problema muy complejo que involucra la prevención de contaminación del suelo y mantos freáticos. El Distrito Federal es uno de las mayores generadores de residuos sólidos urbanos en América con 12,439 (Gobierno del Distrito Federal 2008) ton generadas al día. Es necesario buscar alternativas para la disposición final de estos residuos ya que la situación actual del sitio de destino final, el relleno sanitario Bordo Poniente, ha alcanzado los límites previstos.

En los procesos térmicos los residuos a tratar son la materia prima, de manera que sus características físicas y químicas son de gran utilidad al diseñar los equipos involucrados en los mismos.

El único estudio de caracterización de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal con que se cuenta es el elaborado por la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) en 1999 el cual tuvo como objetivos principales: elaborar un plan para el manejo de los RS del D. F. y realizar un estudio de factibilidad para proyectos involucrados. El estudio mencionado no cuenta con información detallada acerca de su composición elemental o poder calorífico, necesarios en muchos sistemas de disposición final de los residuos; por lo que es necesario realizar un estudio actual de caracterización representativo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal.



1. Marco Teórico y Antecedentes

La humanidad siempre ha mantenido una tendencia de crecimiento, poblacional, en adquisición de bienes con el fin de elevar su calidad de vida. Actualmente se han alcanzado niveles muy altos en cuanto a la calidad de vida de las personas; concretamente en las ciudades ya no se puede pensar en prescindir de ciertas comodidades, como la facilidad para obtener alimentos o el acceso en todo momento a servicios como agua, luz y calefacción.

El uso indiscriminado de estas comodidades ha impactado seriamente el ambiente. La contaminación de cuerpos de agua, liberación de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo son los temas principales en materia de contaminación y siempre se buscan soluciones como el tratamiento de aguas residuales, la limpieza de corrientes gaseosas o la remediación de suelos.

Una problemática no tan estudiada es el manejo de los residuos. Las actividades cotidianas del hombre generan residuos, y su manejo implica importantes consecuencias perjudiciales, sobre todo hablando de grandes cantidades como las que se generan en las grandes ciudades. En Latinoamérica la disposición final más común, para los residuos sólidos urbanos (RSU), la constituyen los rellenos sanitarios o incluso los vertederos a cielo abierto en donde su almacenamiento se efectúa sin un control adecuado, significando un alto riesgo de contaminación de los recursos: suelo, agua y aire, además de peligros potenciales para la salud de la población y de los trabajadores informales de la basura.



1.1. Situación actual de los Residuos Sólidos Urbanos

Para poder dar una solución a los problemas asociados al tratamiento de los residuos sólidos urbanos es necesario conocer sus características principales y los pasos asociados a su gestión.

1.1.1. Panorama Internacional de los Residuos Sólidos Urbanos

La generación de RSU en todo el mundo está sujeta al tipo de población: nivel económico, tipo de alimentación, su tamaño y crecimiento; además de los materiales comúnmente utilizados, cantidad y mantenimiento de áreas verdes. Todas las condiciones mencionadas anteriormente, se reflejan en la composición de los residuos domésticos.

A continuación se puede observar cómo, para diferentes regiones en el mundo, corresponde una composición diferente de RSU. (Tabla 1. 1) Los componentes y proporciones presentados corresponden a la etapa de generación en diferentes partes del mundo.

Tabla 1. 1 Composición de RSU en diferentes zonas del mundo (% másico).

Material		Argentina (Coordinación Generall para la Gestión de Residuos Sólidos 2009) (%)	Australia (Scott, y otros 2005) (%)		EUA (Ching y y Davila 2008) (%)		Sri Lanka (S.N.M. Menikpura 2009) (%)		Grecia (Gidakos, Havas y Ntzamilis 2005) (%)
Orgánicos	Comida	50.0	44.0	24.0	23.0	11.0	62.6	56.6	47
	Jardinería			20.0		12.0		6.0	



Material	Argentina (Coordinación General para la Gestión de Residuos Sólidos 2009) (%)	Australia (Scott, y otros 2005) (%)	EUA (Ching y y Davila 2008) (%)	Sri Lanka (S.N.M. Menikpura 2009) (%)	Grecia (Gidaracos, Havas y Ntzamilis 2005) (%)
Papel y cartón	17.0	24.0	37.0	6.5	20
Plásticos	14.0	7.0	11.0	5.9	8.5
Metales	2.0	3.0	8.0	2.8	4.5
Vidrio	5.0	9.0	6.0	2.0	
Madera y textiles	-	-	13.0	8.1	4.5
Inertes e Inorgánicos	-	-	-	-	15.5
Materiales de construcción			-	3.9	-
Otros	12.0	13.0	2.0	8.2	-
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100

Los residuos domiciliarios en gran parte del mundo tienen como los materiales en mayor proporción a los residuos orgánicos, presentando valores menores para los países con mayor desarrollo. Se encuentran variaciones considerables entre los demás materiales valorizables como cartón, plástico y metales entre otros.

En México no ha sido realizado un estudio de caracterización que englobe los residuos de todo el país por lo que se carece de una composición general, pero puede esperarse una composición semejante a la de Grecia o Argentina, con una gran cantidad de residuos orgánicos y un contenido medio de plásticos, papel y cartón; ya que cuentan con hábitos de consumo, además de un nivel de desarrollo y calidad de vida parecidos a los de México.



1.1.2. Panorama en México de los Residuos Sólidos Urbanos

México es un gran generador de residuos sólidos con un estimado de 102,000 ton_{RS}/día (INEGI 2008), con una tasa de generación per cápita actual de 0.88 kg_{RSU}hab.⁻¹día⁻¹. Desde hace algún tiempo México es uno de los grandes generadores de RSU en el mundo, por debajo de los países más industrializados, como puede apreciarse en una comparación de 2002 en la Tabla 1. 2. Los RSU en México son transportados desde su origen hasta los sitios de disposición final, entre ellos se puede mencionar a los rellenos sanitarios como principal tipo de infraestructura para la disposición final de residuos (57.5% del flujo total del país), seguido por los vertederos a cielo abierto (29%) en donde la disposición de los RSU se efectúa sin un control adecuado. En menor proporción los residuos sólidos en México son dispuestos en rellenos de tierra (9.8%) y la sólo el 3.3% de los residuos es reciclado. (INEGI 2008)

Tabla 1. 2 Generación per cápita en el mundo (Organización Panamericana de la Salud 2002)

País	Generación (kg _{RS} hab. ⁻¹ día ⁻¹)
E. U. A	1.97
Canadá	1.9
Finlandia	1.69
Holanda	1.3
Suiza	1.2
Japón	1.12
México	0.808

México es un país con amplia diversidad, tanto biológica, geográfica y climática; lo cual también se ve reflejado en los hábitos de consumo y en la generación y tipo de residuos que producen. (Tabla 1. 3).



Tabla 1. 3 Composición de los RSU en diferentes zonas del país (% másico) (Organización Panamericana de la Salud 2002)

Subproducto	Frontera Norte	Norte	Centro	Sur
Cartón	3.97	4.37	1.83	4.84
Residuos Finos	1.37	2.23	3.51	8.08
Hueso	0.50	0.64	0.27	0.25
Hule	0.28	0.20	0.09	0.35
Lata	2.93	1.41	1.70	2.97
Material Ferroso	1.18	1.48	0.29	0.40
Material no ferroso	0.23	0.65	0.94	1.70
Papel	12.13	10.56	13.68	8.85
Pañal desechable	6.55	8.31	6.01	5.72
Plástico película	4.79	5.12	1.66	1.72
Plástico rígido	2.90	3.15	1.95	1.23
Residuos alimenticios	26.97	21.27	38.54	16.34
Residuos de jardinería	16.09	19.76	7.11	26.98
Trapo	1.97	2.41	0.81	2.16
Vidrio de color	2.06	0.93	4.25	0.60
Vidrio Transparente	4.59	5.25	5.05	3.72
Otros	11.50	12.27	12.33	14.10
Total	100	100	100.001	100.001

Alrededor del 40% de residuos orgánicos son encontrados en todo el país, con una proporción cambiante entre los residuos alimenticios y de jardinería, además de presentar como componentes mayoritarios al papel, cartón, plásticos y vidrio. En la región central del país donde se encuentra nuestro objeto de estudio, el Distrito Federal, se tienen como componentes mayoritarios a los residuos orgánicos (provenientes de alimentos y de jardinería) con aproximadamente 45% (38.54% de residuos alimenticios y 7.11% residuos de jardinería), seguidos del papel con 13.68%.



1.1.3. Distrito Federal

La Ciudad de México es la capital del país. Se encuentra constituida por 16 delegaciones: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero (G. A. M.), Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco; se encuentra ubicado en la región centro del país en las coordenadas 19°29'52" N y 99°7'37" O y tiene una superficie de 1,479 km² que representa menos del 0.10 % del territorio nacional, lo que resulta en la zona más densamente poblada del país con 5871 personas por kilómetro cuadrado. (INEGI 2000)

En la Tabla 1. 4 se muestra un comparativo de 1998 donde la Ciudad de México se ubicaba como una de las mayores ciudades generadoras de RSU en Latinoamérica.

Tabla 1. 4 Generación per cápita en América Latina (Organización Panamericana de la Salud 1998)

Ciudad	Generación per cápita (kg_{RSU} hab⁻¹ día⁻¹)
México D. F.	1.20
Río de Janeiro	1.00
Buenos Aires	0.88
San José	0.96
Tegucigalpa	0.65
Lima	0.56
San Salvador	0.54



Actualmente la cantidad de residuos generados en la Ciudad de México se ha estimado en una tasa promedio 12,439 toneladas al día (Gobierno del Distrito Federal 2008).

Cada zona del D. F. tiene diferentes características tanto en su población, industria, comercio e incluso zonas verdes; por lo que los residuos que son generados en cada una de ellas tienen una composición y afluencia distinta. El 14.1% del total de residuos generados en el país son generados en el D. F. (Organización Panamericana de la Salud 2002). El D. F. alberga alrededor de 8 millones de habitantes, distribuidos en sus 16 delegaciones. Otro dato importante para entender las costumbres de la población en el D. F. es que el 99.7% es de la población es urbana. (INEGI 2005)

En la Tabla 1. 5 podemos observar los habitantes en cada una de las delegaciones del D. F., la generación de RSU en cada una de ellas y finalmente ha sido calculada la generación de RSU por cada habitante en cada una de las delegaciones resultante del cociente de los residuos generados al día por delegación entre el número de habitantes que alberga.



Tabla 1. 5 Generación de RSU en el D. F.

Delegación	Habitantes (INEGI 2005)	Generación (ton/día) (Gobierno del Distrito Federal 2008)	Generación per cápita ($\text{kg}_{\text{RSU}} \text{hab}^{-1}$ día^{-1})
Álvaro Obregón	706 567	618	0.87
Azcapotzalco	425 298	509	1.20
Benito Juárez	355 017	825	2.32
Coyoacán	628 063	772	1.23
Cuajimalpa de Morelos	173 625	214	1.23
Cuauhtémoc	521 348	1287	2.47
Gustavo A. Madero	1 193 161	1663	1.39
Iztacalco	395 025	461	1.17
Iztapalapa	1 820 888	2584	1.42
Magdalena Contreras	228 927	231	1.01
Miguel Hidalgo	353 534	774	2.19
Milpa Alta	115 895	102	0.88
Tláhuac	344 106	337	0.98
Tlalpan	607 545	784	1.29
Venustiano Carranza	447 459	864	1.93
Xochimilco	404 458	414	1.02
Total	8720916	12439	1.56*

*Promedio ponderado en base a la cantidad de residuos generados por delegación.

Actualmente la generación promedio per cápita al día en el Distrito Federal es de $1.56 \text{ kg}_{\text{RSU}} \text{hab}^{-1}$, siendo la delegación Cuauhtémoc la que



presenta una mayor tasa de generación per cápita que puede suponerse no representativa, debido al alto tránsito de personas en dicha delegación al albergar al Centro Histórico de la Ciudad de México. En el Gráfico 1. 1 se muestra el porcentaje de residuos totales que es generado por delegación en el Distrito Federal.

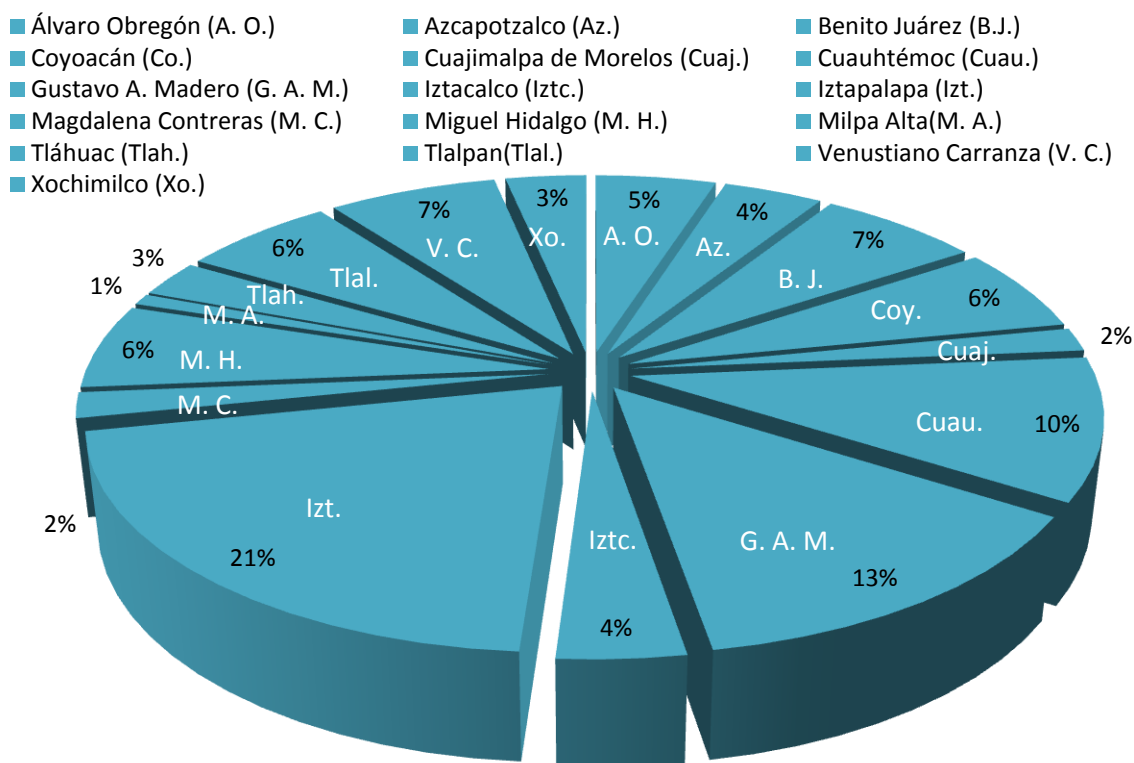


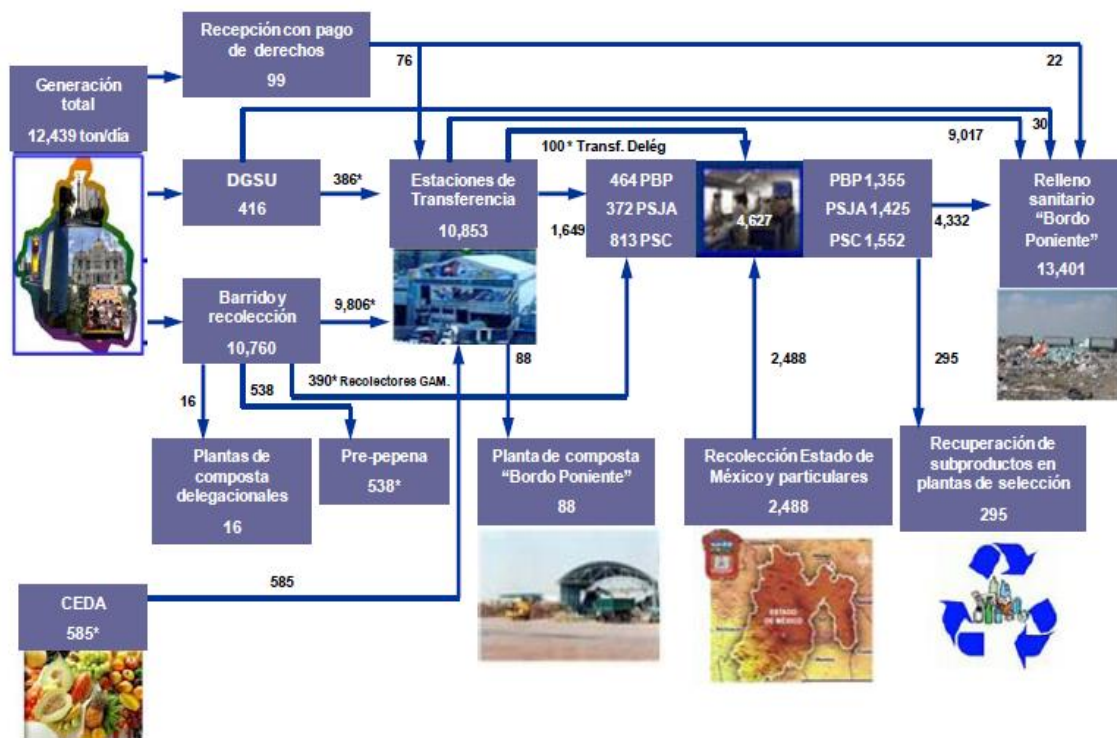
Gráfico 1. 1 Generación de RSU por delegación.

Las delegaciones G. A. M. e Iztapalapa son las que producen la mayor cantidad de residuos, siendo también las más pobladas, y es así que representan el 13% y 21% de la generación de residuos en el D. F., respectivamente. Mientras que Milpa Alta (1%), Cuajimalpa (2%) y Magdalena Contreras (2%) son las delegaciones que generan una menor cantidad de residuos al día, y que al mismo tiempo presentan la menor cantidad de habitantes.



1.1.3.1. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal.

Los residuos son recolectados de manera domiciliaria o mediante módulos de barrido en las calles, para después ser llevados a las Estaciones de Transferencia, donde los RSU se transfieren en 2 tipos de tolvas, de acuerdo a su composición (orgánica e inorgánica). Una vez realizado lo anterior, la carga de los camiones recolectores es transferida a un tráiler con mayor capacidad y son enviados para: ser dispuestos como composta, ser seleccionados y reciclados o ser depositados en el relleno sanitario, Bordo Poniente. (Ver Figura 1. 1)



* Datos estimados
CEDA: Central de Abastos
DGSU: Dirección General de Servicios Urbanos

PBP: Planta Bordo Poniente
PSJA: Planta San Juan Aragón
PSC: Planta Santa Catarina

Figura 1. 1 Diagrama de Flujo de RSU en el D. F. (**Gobierno del Distrito Federal 2008**)



La fracción que llega al relleno sanitario proveniente de lo sobrante de las plantas de selección y aquella que se considera de bajo contenido en materiales reciclables estaciones de transferencia, es susceptible de ser valorizada para darle un tratamiento distinto al simple almacenamiento.

De acuerdo a los diferentes pasos para el manejo de los residuos sólidos del D. F., se pueden resumir en las siguientes etapas:

- **Generación:** Es la primera etapa, y se lleva a cabo tanto en la industria como en los domicilios, y mercados.
- **Recolección:** Dicha etapa se relaciona con los residuos domiciliarios y para aquellos encontrados en las calles, ya que los residuos provenientes de la industria no son recolectados por el servicio de limpieza. Dicha recolección se realiza mediante camiones y unidades de barrido. Es durante esta etapa que se realiza una prepepeña, donde trabajadores informales recolectan residuos reciclables.
- **Transferencia:** Una vez recolectados los residuos, llegan a las estaciones de transferencia, donde se colectan en un tráiler, el cual cuenta con una mayor capacidad que los camiones, y son transportados a las plantas de selección, plantas de composta o directamente al relleno sanitario.
- **Disposición final:** Los residuos que entran en esta etapa son todos aquellos que se envían al relleno sanitario, ya sea que su sitio de procedencia sea una estación de transferencia o una planta de selección.

Actualmente el 3% de los residuos es valorizado: 88 ton/día son dispuestas como composta y 294 ton/día son recuperadas para reciclaje



en las plantas de selección (Gobierno del Distrito Federal 2008). De manera que casi el total de residuos generados son almacenados en el relleno sanitario Bordo Poniente, por lo que buscar nuevos tratamientos de disposición final se convierte en una prioridad mediante los se reduzca el volumen de los residuos producidos en la ciudad, y que además sea adecuado a las características específicas de los mismos.

1.1.3.2. Estaciones de Transferencia

El Distrito Federal cuenta con 13 centros a donde llegan los residuos de la etapa de recolección, se les llama estaciones de transferencia, y en ellos se reúnen grandes cantidades de residuos (miles de toneladas al día) para posteriormente ser enviados a los llamados destinos finales (planta de composta, planta de selección o el relleno sanitario Bordo Poniente).



Figura 1. 2 Distribución de las Estaciones de Transferencia.



Como se muestra en la Figura 1. 2 las estaciones de transferencia se encuentran distribuidas en todo el D. F. y generalmente reciben el nombre de la delegación en que se encuentran.

A las estaciones de transferencia los residuos llegan mediante camiones recolectores que pueden traer residuos urbanos, de mercado y poda; además de particulares provenientes de industrias pequeñas que hacen convenios con las delegaciones y pueden traer de otra zona.

Las estaciones de transferencia tienen instalaciones similares (ver Figura 1. 3): todas son estaciones de descarga directa, de manera que los camiones recolectores ascienden a un patio de maniobras localizado en un primer piso de la instalación y descargan los residuos en una tolva, bajo la cual se colocan los tractocamiones a través de un túnel en la parte inferior llamado "túnel de transferencia" y una vez llenos se cubren con una lona y los residuos son trasladados de la estación de transferencia a Bordo Poniente, a las plantas de selección o de composta. Otro aspecto similar es que no se realiza separación de residuos dentro de las estaciones.



Figura 1. 3 Mapa de la E. T. Álvaro Obregón.



En cada estación el parque vehicular es diferente debido a que su uso es reflejo de la cantidad de residuos que son transferidos en cada estación. Mediante una báscula son generados registros de las cantidades de RSU que son transferidos, los registros también incluyen movimientos en la estación, además de la frecuencia y modo de operación en las tolvas de descarga. Cada estación de transferencia recibe los residuos de 1 o más delegaciones, además de otros grandes generadores como la central de abastos.

Las estaciones de transferencia del Distrito Federal presentan de 1 a 8 tolvas de descarga. En la mayoría de las estaciones se cuenta con por lo menos una tolva destinada para residuos orgánicos, de manera que los residuos podrían ser separados para su disposición final, excepto la ET Milpa Alta donde se cuenta con una única tolva. Sin embargo debido a que el flujo de residuos transferido es muy alto o las tolvas no se encuentran en operación, no se realiza una correcta transferencia de residuos de acuerdo a su clasificación (orgánicos o inorgánicos) colocándolos en la tolvas correspondiente. La Tabla 1. 6 describe la separación actual en las estaciones de transferencia.



Tabla 1. 6 Recepción de RSU por ET.

Forma de separación por delegación		Estaciones de Transferencia											
		Álvaro Obregón	Azcapotzalco	Benito Juárez	Coyoacán	Cuauhtémoc	Gustavo A. Madero	Iztapalapa 1	Iztapalapa 2	Miguel Hidalgo	Milpa Alta	Tlalpan	Venustiano Carranza
Álvaro Obregón	Orgánica												
	Mezcla	X				X							
Azcapotzalco	Orgánica		X										
	Mezcla		X			X	X						
Benito Juárez	Orgánica												
	Mezcla			X									
Central de Abastos	Orgánica						X						
	Mezcla						X						
Coyoacán	Orgánica												
	Mezcla				X								
Cuajimalpa	Orgánica	X											
	Mezcla	X											
Cuauhtémoc	Orgánica												
	Mezcla		X			X							
Gustavo A. Madero	Orgánica												
	Mezcla		X				X						
Iztacalco	Orgánica												
	Mezcla							X				X	
Iztapalapa	Orgánica												
	Mezcla								X				
Magdalena Contreras	Orgánica												
	Mezcla	X									X		
Miguel Hidalgo	Orgánica								X				
	Mezcla						X		X				
Milpa Alta	Orgánica												
	Mezcla									X			
Tláhuac	Orgánica												X
	Mezcla												X
Tlalpan	Orgánica												
	Mezcla				X						X		
Venustiano Carranza	Orgánica											X	
	Mezcla					X	X					X	
Xochimilco	Orgánica												
	Orgánica				X								X



1.1.4. Legislación de Residuos Sólidos en México

En México se tiene un marco normativo en materia de residuos sólidos que se desprende desde la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y a través de diferentes leyes en las cuales se establece qué organismos serán responsables de la gestión de los residuos en cada una de sus etapas. A continuación se presenta un resumen de las leyes más importantes relacionadas con los residuos sólidos. El artículo 115° de la Constitución establece que los municipios serán los encargados del servicio de limpia, mientras que el artículo 116° señala que la federación y los estados podrán delegar la operación, construcción y prestación de servicios tales como la gestión de residuos.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) es de carácter reglamentario para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, además de la protección del ambiente. En cuanto a la gestión de residuos, establece que las obras de infraestructura involucradas deben cumplir requerimientos de riesgo e impacto ambiental correspondiente en las entidades federativas; además de tomar en cuenta la protección de las aguas y suelo por contaminación relacionada con los residuos sólidos. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007)

La ley que se encarga de la protección al ambiente en materia de residuos sólidos es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona a un medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable. Establece las bases para la valorización y disposición final de residuos, la cual está limitada para aquellos cuyo tratamiento o



valorización no sea económicamente viable, tecnológicamente factible o ambientalmente adecuada. También se impone como facultad de la federación crear normas oficiales mexicanas (NOM) para la gestión integral de los residuos sólidos, además de la realización de inventarios de residuos en sitios oficiales al igual que en tiraderos clandestinos.

A continuación se presentan algunas definiciones útiles en cuanto a materia de residuos sólidos se trata, presentes en la LGPGIR (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente 2003):

- Disposición final: acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios o instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población, a los ecosistemas y sus elementos.
- Generación: Acción de producir residuos a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo
- Gestión Integral de Residuos: Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.
- Incineración: Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la



temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirólisis, la gasificación y plasma, sólo cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno.

- Lixiviado: Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.
- Valorización: Principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica

En uno de los apartados de la LGPGIR se establece que las NOM's fijarán los requisitos que deben cumplir las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos. En cada entidad municipal debe de contarse con un Programa Municipal de Prevención Integral de los RSU, en el cual se defina una planeación para la gestión integral de los residuos sólidos e integre las políticas en materia de RSU. La única



norma oficial mexicana en materia de residuos es la 083-SEMARNAT-2003, que establece especificaciones de protección ambiental, del diseño y operación de un relleno sanitario; y debe hacerse cumplir por los municipios. (SEMARNAT 2008).

Cabe destacar que la legislación actual se refiere a la disposición final como únicamente el confinamiento de los residuos, y no ha sido actualizada en cuanto a las tecnologías alternativas de disposición final; además de no contar con guías oficiales para el correcto estudio, manejo y disposición de los residuos.

1.2. Disposición Final de los Residuos Sólidos Urbanos

La disposición de los residuos se refiere al tratamiento confiable y seguro que se le da a todos aquellos componentes, remanentes, que no han podido ser reciclados, a todo aquello que se conoce como residuos de los desechos.

Existen diferentes opciones para la disposición de los residuos sólidos; durante mucho tiempo lo más utilizado ha sido el almacenamiento de los mismos, que se lleva a cabo de manera regulada mediante los rellenos sanitarios, donde residuos orgánicos e inorgánicos pueden ser almacenados. También existen diferentes métodos de acuerdo a la composición de los residuos, como la metanización o la producción de composta a partir de la fracción orgánica, y el uso de la fracción inorgánica como combustible en un proceso térmico; sin olvidar que también existen tecnologías para disponer la fracción orgánica como combustible. (Bagchi 2004). A continuación se abordan las opciones de disposición final más comunes para dar tratamiento a residuos sólidos urbanos.



1.2.1. Relleno Sanitario

Históricamente los residuos sólidos han sido depositados en la superficie del suelo, y desde finales de siglo pasado se han utilizado obras de construcción ingenieril conocidas como rellenos sanitarios, que son diseñadas y operan con el objetivo de reducir el impacto al ambiente y a la salud pública. Los rellenos sanitarios deben diseñarse para proteger al ambiente de las sustancias contaminantes contenidas en los residuos sólidos. Para su mejor operación un relleno sanitario debe contar con un sistema de monitoreo para prevenir la contaminación de agua o emisiones de gases contaminantes, y debe restringirse el ingreso a ciertos materiales como las baterías, aceite de motor o pinturas.

A cierta edad los rellenos sanitarios tienen el potencial de transformar las emisiones de gases en metano (CH_4), que muchas veces es utilizado para generar energía.

Un relleno sanitario opera en un área determinada, sobre la cual son colocadas celdas de material de disposición, el término celda es utilizado para describir el volumen de material colocado en el relleno durante un periodo de operación, generalmente un día. Una celda incluye el residuo depositado, y el material usado para cubrirlo. Generalmente el material de recubrimiento lo constituyen entre 6 y 12 pulgadas de suelo nativo, arena o composta.

El material de recubrimiento es usado para prevenir olores y la dispersión de los materiales causada por el viento, además de prevenir la entrada de agua; también ayuda con el control epidemiológico (ratas, moscas y cucarachas entre otras).



Una vez que toda el área activa del relleno es cubierta con celdas, se procede a colocar una nueva capa en la parte superior. Generalmente un relleno sanitario está diseñado para almacenar varias capas. Cuando la altura del relleno excede de los 50 a 75 ft se coloca una (cama, banca o terraza) de material de recubrimiento. Finalmente cuando el relleno llega a su capacidad máxima la capa final de residuos requiere otra capa de material de cobertura. Una cubierta final es colocada sobre toda la superficie del relleno después de que han acabado todas las operaciones.

Para controlar los gases generados por los desechos y los líquidos acumulados en la parte inferior, llamados lixiviados, se utilizan los llamados materiales delineadores que añaden resistencia química al terreno. Los llamados delineadores son colocados al fondo y en los límites del relleno que se encuentran debajo del suelo. Consisten en capas sucesivas de arcilla compacta y/o material geosintético colocado para prevenir la migración de lixiviados y gases. Los delineadores geosintéticos, mejor conocidos como geomembranas, están constituidos por polímeros, entre los cuales se encuentran el polietileno de alta densidad, polietileno lineal de baja densidad, cloruro de polivinilo y el polietileno clorosulfonado.

Los lixiviados en general son resultado de la percolación, precipitación e irrigación de agua sobre el relleno, además de contener el agua que contenían inicialmente los residuos. Los lixiviados contienen diversos componentes químicos provenientes de la solubilización de los residuos y de las reacciones químicas y bioquímicas que se desarrollan en los mismos. (Bagchi 2004)



1.2.2. Tratamientos Térmicos

Los procesos térmicos constituyen la alternativa principal disposición final para sustituir a las unidades de almacenamiento como los rellenos sanitarios y prevenir los tiraderos a cielo abierto. Los beneficios que brinda este tipo de tratamiento son dos principalmente: reduce el volumen de desperdicios y genera calor reutilizable.

También son llamados procesos de conversión térmica, debido a que el reactor utilizado en todos estos procesos es un horno donde los residuos son transformados a altas temperaturas. Pueden clasificarse de acuerdo al consumo de oxígeno en el proceso de la siguiente forma:

Incineración > Gasificación > Pirólisis

El uso de instalaciones de conversión térmica no es muy común en EUA, aunque existen casos, a diferencia de Japón y Europa donde son ampliamente utilizados (Bagchi 2004).

1.2.3. Incineración

El término incineración ha adquirido una mala connotación debido a una mala operación de algunas plantas en el pasado, principalmente en el control de emisiones atmosféricas entre las que se encuentra la liberación de compuestos tóxicos como las dioxinas y cenizas de los residuos. Es muy común que se utilice el término Waste-to-Energy (Residuos-a-Energía) cuando se hable de la incineración o combustión de residuos y de ellos obtener energía; evitando mencionar incineración. Se estima que los residuos comunes pueden generar de 4000 a 7000 Btu/lb por incineración. (Pichtel 2005)



A continuación se presenta el esquema de funcionamiento del centro de incineración con valorización energética Ivry Paris XIII, que como su nombre lo indica se encuentra en el 13° municipio de Paris, y cuya última remodelación data de 1997. Tiene una capacidad de 600,000 toneladas por año y fue reportado que para el año 2007 la planta valorizó cerca del 90% de los residuos que ingresaron (ALCYONE 2006). A continuación se describe el proceso de conversión térmica de los residuos sólidos urbanos que se lleva a cabo en Ivry Paris XIII y el cual está representado en la Figura 1. 4.

1. Llegada de residuos: Cada día los desechos recolectados para una población de alrededor de 1 200 000 de habitantes llegan al centro y son vaciados en una fosa.
2. Horno Caldera y remoción de metales: Tomados mediante ganchos los residuos son colocados en el horno e incinerados a 900 °C. En la parte baja del horno se conjuntan los materiales pesados como metales, comúnmente fluidizados y posteriormente se usan en obras públicas.
3. Equipo de generación de electricidad: El calor generado de la incineración de los residuos es transformado en vapor y después en electricidad. El vapor es vendido a la Compañía Parisina de Calefacción Urbana, lo que permite dar calefacción a alrededor de 70,000 hogares al año, en cuanto a la electricidad una parte es utilizada en el funcionamiento del centro y la otra parte es vendida.
4. Primera etapa de tratamiento de emisiones: Son removidas las partículas en suspensión mediante precipitadores electrostáticos.



5. Reactor catalítico para la destrucción de dioxinas y óxidos de nitrógeno: Es la segunda etapa de tratamiento de emisiones en donde se eliminan dioxinas, furanos y óxidos de nitrógeno mediante un tratamiento catalítico a 250 °C.
6. Lavado y Venturi: Los gases son tratados mediante un filtro de partículas finas y lavados a fin de remover los componentes ácidos (cloruro de hidrógeno y óxidos de azufre).
7. Análisis de emisiones atmosféricas: Se registran, en la chimenea, los componentes y las emisiones que son liberadas a la atmósfera, se analizan los datos y son remitidos a la autoridad competente.

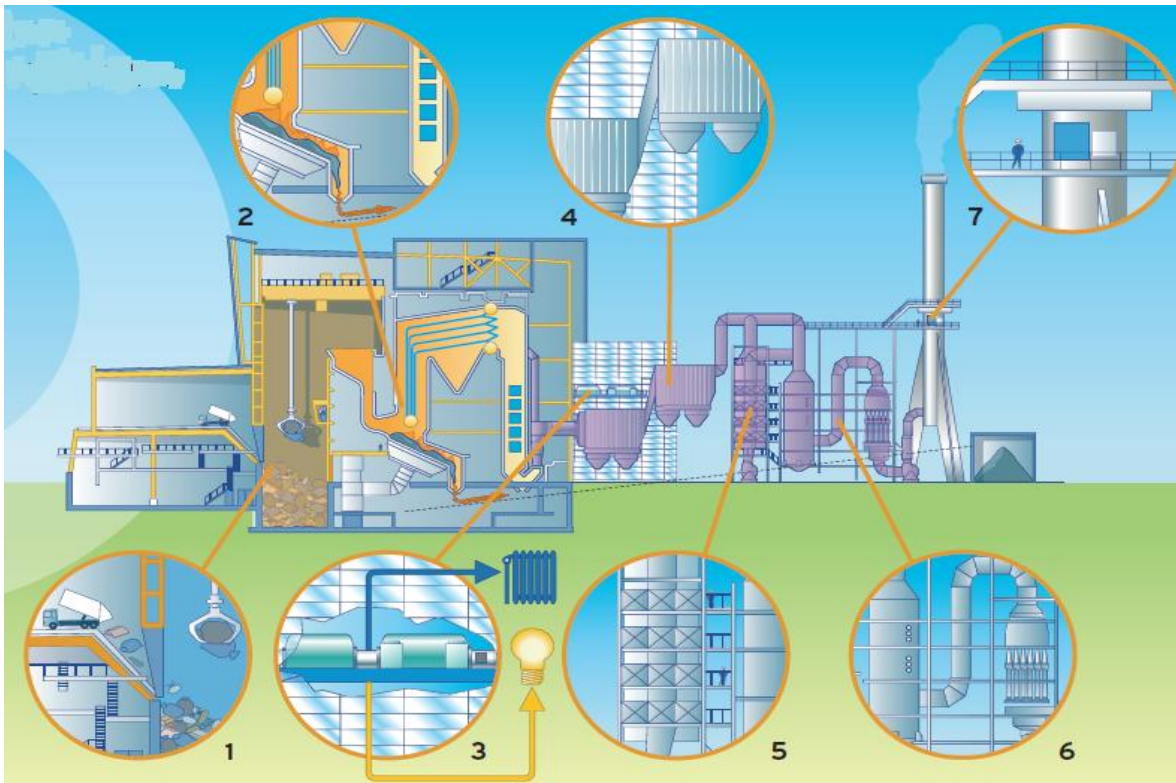


Figura 1. 4 Diagrama de Planta Incineradora IVRY Paris XIII
(ALCYONE 2006)



1.2.4. Gasificación

La gasificación es un proceso de descomposición térmico en la que se proporciona la energía necesaria para romper los enlaces de la materia prima (residuos). Este proceso se realiza en presencia de un agente gasificante (aire, aire enriquecido con oxígeno o vapor de agua) a concentraciones de oxígeno subestequiométricas, en el que se obtiene como producto principal un gas combustible compuesto principalmente de CH_4 , H_2 , CO y CO_2 llamado gas de síntesis que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica. Actualmente la gasificación se está aplicando como alternativa a la incineración para el tratamiento térmico de los RSU, en países como Japón y Alemania, en los que existe mayor experiencia en el manejo de los RSU, la gasificación ya se encuentra como sistema de tratamiento dentro del manejo integral de sus residuos. (Pichtel 2005)

En general, el proceso de gasificación de RSU está compuesto por las siguientes etapas:

- Recepción de los residuos
- Acondicionamiento de los residuos: consiste fundamentalmente en realizar una segregación de los mismos con el objetivo de recuperar la fracción reciclable y remover los componentes con grandes volúmenes, además de humedad.
- Conversión térmica: se llevan a cabo las reacciones de transformación de los residuos a gas de síntesis. Se pueden distinguir dos tipos de gasificación: la que se lleva a cabo mediante la combustión parcial de los residuos a temperaturas de hasta $1,500\text{ }^\circ\text{C}$, denominada convencional, en la que primero se



gasifican los residuos y después hacen combustión; y aquella que utiliza un arco de plasma alcanzando temperaturas de hasta 10,000°C logrando que las moléculas contenidas en los residuos se disocien, de manera que se convierten en gas e inmediatamente hacen combustión.

- Recuperación de energía: la forma más usual es el uso del gas de síntesis para alimentar a una caldera, generando vapor que puede ser alimentado a una turbina para producir energía eléctrica, también existe la posibilidad de hacer uso directo del gas de síntesis en turbinas de gas.
- Limpieza de gases: tiene dos objetivos principales, el primero es acondicionar el gas de síntesis para su posterior combustión en una maquina térmica y el segundo es eliminar aquellos compuestos contaminantes generados durante el proceso, permitiendo que las emisiones al medio ambiente se encuentren dentro de los límites establecidos.

Entre las empresas que destacan como proveedoras de procesos de tratamiento de RSU mediante gasificación se encuentran Interstate Waste Technologies (con la tecnología Thermoselect) y Nippon Steel (con tecnología de fusión directa), ambas con instalaciones en Japón.

A continuación se presenta el proceso de gasificación de Thermoselect (Figura 1. 5), que tiene plantas en Japón y el área de Los Angeles, con capacidades de 120 a 600 ton/día. Se trata de un proceso estándar en el cual encontramos como principal particularidad el acondicionamiento de los residuos, los cuales se conducen por una prensa donde se extrae agua y aire, posteriormente en la unidad desgasificadora son calentados



a 400°C para evaporar el agua restante; y posteriormente son llevados al horno de alta temperatura donde se realiza la gasificación mediante quemadores de gas natural y lanzas de oxígeno, con las cuales se llega a temperaturas de 2000°C. El gas de síntesis sale por la parte superior a una temperatura de 1200°C y se lleva rápidamente a una zona de apagado para evitar la formación de hidrocarburos clorados al enfriarlo a menos de 90°C. La limpieza se realiza en varias fases, durante la cual se absorben o condensan los contaminantes. La materia que no se transformó a gas es fundida y homogeneizada en un canal anexo al reactor de alta temperatura, este canal tienen una temperatura que va de los 1,600 °C a los 2,000 °C. (Thermoselect 2003)

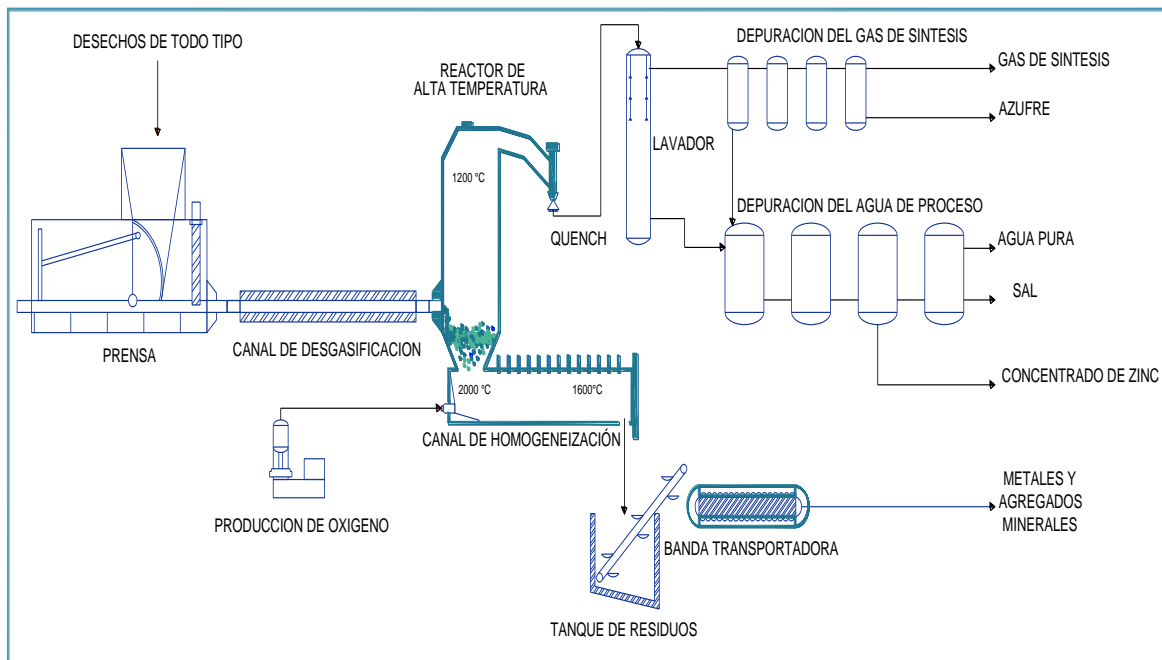


Figura 1. 5 Proceso de gasificación Thermoselect.
(Thermoselect 2003)



En la actualidad, la gasificación RSU ha comenzado a cobrar mayor importancia en los países occidentales y a presentarse como opción factible para la disposición final de RSU, ejemplo de esto es Estados Unidos, donde se han llevado a cabo estudios sobre la aplicación de esta tecnología y ya existen proyectos en desarrollo para su implementación.

1.2.5. Pirólisis

Por definición un proceso de pirólisis es una descomposición de materia, principalmente orgánica, mediante calentamiento en ausencia de oxígeno; y constituye otro método de disposición final para los residuos sólidos mediante el cual se reduce su volumen y se obtiene un material combustible aprovechable en la generación de energía.

A continuación se describe el proceso de pirólisis "R21" (Figura 1. 6) de la empresa Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. (MES), el cual es utilizado para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos en el que la materia carbonosa contenida en los mismos, que es pirolizada, y las cenizas obtenidas son fundidas. Aunque la tecnología básica es licencia de Siemens de Alemania en, MES ha hecho ajustes al diseño original. La planta R21 está diseñada para tratar residuos sólidos de casa-habitación y de comercios con un poder calorífico de 4,200 a 10,000 kJ/kg (Recycling 2003) El proceso R21 está constituido de las siguientes etapas:

- Recepción de los residuos: Se realiza una separación manual que incluye la recuperación de residuos de gran tamaño.
- Trituración y almacenamiento provisional: Los residuos que salen de la separación van a una trituradora y se almacenan. En seguida los desechos se recuperan por medio de una grúa y se introducen



en una unidad de trituración biaxial. Esta trituradora reduce los residuos a un tamaño máximo de 200 mm. La trituradora se alimenta por medio de una banda transportadora a la entrada de una tolva, la cual alimenta el reactor de pirolisis (Greater London Authority 2003).

- Pirolisis: En el reactor de pirólisis los residuos son sometidos a secado y pirolisis de baja temperatura (alrededor de 450°C), sin adición de oxígeno, en un reactor de tambor rotatorio el cual es calentado indirectamente pasando una corriente de aire caliente a través de un intercambiador de calor que se encuentra a lo largo del tambor. El tiempo de residencia es de una hora. Del proceso se obtiene: gas de síntesis compuesto principalmente por metano, hidrógeno e hidrocarburos; y residuos sólidos.
- Recuperación de gas y materiales: Los residuos obtenidos en el proceso de pirólisis son separados del gas de síntesis obtenido, se enfrían y se hacen pasar por un sistema de separación de metales, en el que se recuperan los ferrosos y no ferrosos para ser reciclados. Por otra parte a estas altas temperaturas las cenizas son vitrificadas y posteriormente se pueden utilizar en la construcción.
- Combustión del gas y el material carbonoso (char): Los residuos sólidos remanentes (residuos carbonosos y material inerte) son pulverizados a un tamaño máximo de 1 mm y por medio de transportadoras neumáticas se introducen en la cámara de combustión y se mezclan con el gas de síntesis, esta cámara de combustión se encuentra a una temperatura de aproximadamente 1,300°C (Greater London Authority 2003) y se encuentra a bajos



niveles de exceso de aire, minimizando la formación de dioxinas y gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno.

- Generación de energía eléctrica: Los gases obtenidos del horno de combustión son utilizados para calentar el aire que se utiliza para el calentamiento indirecto del reactor de pirólisis. El aire caliente es circulado en un ciclo cerrado mediante un soplador. La caldera de recuperación de calor residual genera vapor con temperatura de 400 °C y una presión de 40 bar que se utilizan para alimentar a un turbogenerador.
- Limpieza del gas obtenido: Los gases de combustión son limpiados mediante dos series de filtros bolsa, la primera seria de filtros bolsa es utilizada para coleccionar las cenizas volantes y las cenizas de caldera que son recicladas en la cámara de combustión, evitando enviar cenizas volantes a un sitio de disposición final. La otra serie de filtros bolsa está equipada con un sistema de inyección de piedra caliza para abatir la emisión de gas ácido (Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd 2003). Los residuos sólidos obtenidos de este proceso son enviados a un sitio de disposición final de residuos peligrosos y los gases son enviados a una chimenea.

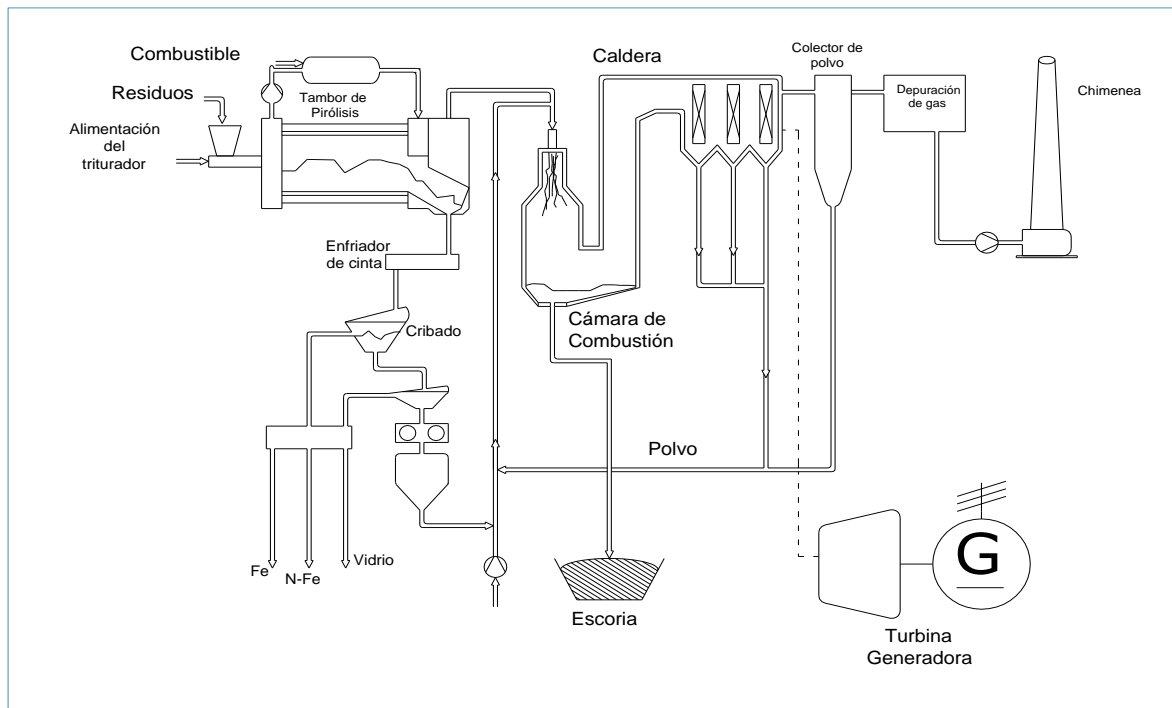


Figura 1. 6 Proceso de la tecnología Mitsui Recycling 21 (Malkow 2003)

Una corriente de RSU sin procesar tiene un poder calorífico aproximado de 11,650 kJ/kg, esta misma corriente contiene generalmente entre 20 y 50% de humedad, y aproximadamente el 50% de su masa son materiales combustibles (Pichtel 2005). Si se pretende recuperar energía al disponer los RSU mediante tratamientos térmicos deben considerarse ciertas variables: el contenido de humedad, ya que la eliminación de agua también consume energía; el porcentaje de materiales combustibles, la cantidad de cenizas contenidas que quedarán como último residuo; además de la energía que pueden liberar los residuos mediante estos procesos. Es por eso que es necesario caracterizar una corriente de RSU y determinar si constituye un buen combustible a sus condiciones actuales y en caso contrario determinar las condiciones a las que podría comportarse como un mejor combustible.



1.3. Muestreo y caracterización de residuos sólidos

1.3.1. Necesidades de caracterización

Con el fin de formular un sistema integral de manejo de residuos sólidos debe construirse una base de datos descriptiva de los residuos a tratar, sobre todo en cuanto a su composición y cantidades a manejar.

Conocer la composición de los RSU puede ser de ayuda para un ingeniero o científico, en caso de utilizarlos como combustible, o para diseñar el tren de tratamiento de emisiones gaseosas después de su incineración, así como el contenido de gases peligrosos contenidos en las cenizas. En el caso de la fracción orgánica puede obtener información valiosa para denominar los residuos como buen material de composta o para conversión biológica a combustible biogás. Además en caso de escoger una opción de disposición final de almacenamiento húmedo la información será útil para predecir la composición de los lixiviados que puedan llegar a formarse. Las propiedades físicas, como la densidad o contenido de humedad pueden ser de utilidad para indicar condiciones de transporte, requerimientos de su procesamiento, características de combustión y una predicción aproximada en cuanto al tiempo de vida de un relleno sanitario. Finalmente es de gran utilidad conocer la cantidad de energía que puede obtenerse de la combustión de los residuos. (Pichtel 2005)

El único estudio de caracterización de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal con que se cuenta es el elaborado por la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) en 1999, el cual tuvo como objetivos principales: elaborar un plan para el manejo de los RS del D. F. y realizar un estudio de factibilidad para proyectos involucrados. El estudio



mencionado no cuenta con información detallada acerca de su composición elemental o poder calorífico, necesarios en muchos sistemas de disposición final de los residuos; por lo que es necesario realizar un estudio actual de caracterización representativo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal. (JICA 1999)

1.3.2. Estudios de caracterización de residuos sólidos urbanos

En general, para realizar un estudio de caracterización de RSU deben seguirse los pasos que a continuación se presentan (Bagchi 2004):

- 1) Analizar el flujo de los residuos a estudiar y definir la corriente de interés.
- 2) Identificar puntos de muestreo y decidir la frecuencia y tamaño de muestra.
- 3) Realizar el muestreo representativo de la corriente de estudio.
- 4) Aplicar los análisis correspondientes a la muestra. (aquellos que son de interés al estudio: físicos, químicos, etc.)

Además de estos 4 pasos mencionados anteriormente ha sido agregado una nueva etapa, de planeación, que incluye: investigación previa de procedimientos similares o guías, tales como normatividades; así como el reconocimiento previo de los lugares de muestreo.

Por lo que se ha propuesto realizar un estudio de este tipo clasificando sus diferentes pasos en 3 grandes actividades:



- **Planeación:** Es un trabajo de investigación, análisis y definición de actividades. Para esta actividad es necesario buscar procedimientos similares, además de guías e investigaciones precedentes.
- **Muestreo:** Incluye la definición de la corriente de estudio, el sitio de muestreo, así como el tamaño representativo de la muestra y su frecuencia de muestreo. Todo ello previo a la toma de la muestra como paso último y definitivo en dicha actividad.
- **Caracterización:** Está constituida por actividades orientadas a la definición de parámetros a evaluar en la muestra, así como su ejecución.

1.3.3. Revisión de normatividad Nacional e Internacional

En el mundo existen diversos procedimientos para llevar a cabo un muestreo y su posterior caracterización de residuos sólidos, a continuación se hará una revisión de procedimientos normados oficialmente como guías de seguimiento en ciertos países, y documentos no obligatorios, además del caso particular de una industria europea de gestión de residuos.

1.3.3.1. EUA

En este país se siguen las normas voluntarias diseñadas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés. Teniendo como un procedimiento estándar, para el muestreo y determinación de la composición de los RSU a la norma ASTM-D-5231-92 "Método de prueba estándar para la determinación de la composición de residuos sólidos municipales sin procesar". Este procedimiento se



basa en la colección y separación manual de los RSU, en un periodo de tiempo dado, teniendo como mínimo una semana. Puede ser aplicado en sitios de relleno, estaciones de transferencia, sitios de proceso e instalaciones de conversión de residuos.

El procedimiento propuesto es el siguiente:

- a) Preparar sitio de trabajo: Asegurar un área de trabajo limpia y plana donde se puedan descargar los RSU; posteriormente se colocan las balanzas, determinando su precisión, y son pesados los contenedores que se usaran para clasificar los subproductos.
- b) Determinación del tamaño de muestra: El número de muestras a tomar se determina de acuerdo al componente que se encuentre en mayor proporción y la confiabilidad deseada. De manera que se asigna un dato de una media (μ) y una desviación estándar estimada (s), tomado de un estudio previo de los RSU en E. U. A.

$$n = \left\lceil \frac{t * s}{e * \mu} \right\rceil$$

Siendo:

n = tamaño de muestra

s = desviación estándar estimada

t = estadístico t correspondiente al nivel de confianza deseado

e = nivel de precisión deseado.

μ = media estimada

Usando la ecuación anterior se determina el número de muestras (n), usando el valor de desviación estándar (s), (μ) media conocidos, y asignando un valor de precisión deseado; se realiza un primer cálculo,



con un valor del estadístico t , correspondiente a un nivel de confianza deseado y a un número de muestras n . Posteriormente se realiza un cálculo definitivo, ahora tomando el valor de (t) para el número de muestras obtenido en el primer cálculo.

El valor obtenido (n) se distribuye entre el número de días (k) que dura el muestreo. Teniendo (n/k) muestras por día. Cada muestra es tomada de un camión.

- c) Toma de muestra: Seleccionando los camiones de manera aleatoria, cualquier método es válido, se usa un recipiente de 1 yd^3 ($0.765 m^3$) para remover material de los residuos que contiene el camión, el cual previamente verterá su contenido en el área asegurada. Con dicho material se realiza un cuarteo, en el área asegurada, de manera que uno de los cuartos será la muestra tomada. Durante el muestreo se toman los datos del vehículo y del operador, que sean necesarios. Un cuarteo se refiere a colocar los residuos en un área determinada, mezclarlos y, una vez que se considere se encuentren homogéneos, son divididos en 4 partes iguales.
- d) Determinación de composición: En base a una lista propuesta en la norma, se segregan los subproductos dentro de los contenedores. Posicionar recipientes para separar materiales, previamente pesados. La segregación termina cuando el tamaño de partícula del restante es de aproximadamente 1 pulgada, y finalmente se pesan los recipientes con muestra. Como último paso se limpia el sitio asegurado, el usado en la segregación.



1.3.3.2. Unión Europea

El organismo regulador en esta región del mundo es el Comité Europeo de Normalización (CEN), la cual es una organización internacional no lucrativa que busca proveer una plataforma de desarrollo para normas europeas. Cuenta con 31 miembros que son organizaciones de normalización en los 28 países pertenecientes a la UE, y otros 3 de países pertenecientes a la Asociación Europea de Comercio Libre (EFTA); entre los países a los que pertenecen dichas organizaciones encontramos a Alemania, Francia, Bélgica y Reino Unido. Se busca que cada una de dichas organizaciones promueva la implementación de dichas normas de la Unión Europea (UE) como nacionales ayudando a derribar barreras comerciales para el consumidor y la industria. (Comité Europeo de Normalización 2010)

En normatividad concerniente al muestreo y caracterización de residuos sólidos se encuentra una norma desarrollada en 5 partes (Tabla 1. 7). La cual aborda integralmente el muestreo de residuos sólidos desde los criterios utilizados para realizar el estudio, técnicas de muestreo y planeación hasta el transporte y conservación de las muestras.



Tabla 1. 7 Normatividad de Muestreo y Caracterización en la UE.

Norma	Nombre completo
CEN/TR 15310-1:2006	Characterization of waste - Sampling of waste materials - Part 1: Guidance on selection and application of criteria for sampling under various conditions
CEN/TR 15310-2:2006	Characterization of waste - Sampling of waste materials - Part 2: Guidance on sampling techniques
CEN/TR 15310-3:2006	2006Characterization of waste - Sampling of waste materials - Part 3: Guidance on procedures for sub-sampling in the field
CEN/TR 15310-4:2006	Characterization of waste - Sampling of waste materials - Part 4: Guidance on procedures for sample packaging, storage, preservation, transport and delivery
CEN/TR 15310-5:2006	Characterization of waste - Sampling of waste materials - Part 5: Guidance on the process of defining the sampling plan

Los principales criterios a seguir en la normatividad mencionada tiene que ver con el enfoque de estudio a realizar, ya sea de tipo físico, para análisis químicos o para composición de subproductos estableciendo diferencias considerables, que van desde el tamaño de muestra y su frecuencia hasta el tiempo de almacenamiento.

Como caso particular tomaremos a Francia, país en el que el organismo regulador de la normalización es la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), que es un grupo internacional de servicios, formado con el fin de satisfacer 4 competencias: la normalización, la certificación, la edición y especialidad en la formación. Tiene más de



75000 clientes distribuidos en 90 países; y cuenta con 80 años de experiencia en los procesos de regulación voluntaria. AFNOR es el organismo de Francia que pertenece a la Comisión Europea de Normalización y pretende que se ejecuten sus normas en todo el país aunque existen casos de procedimientos documentados, con otra metodología. (Comité Europeo de Normalización 2010)

En el caso específico de Grupo TIRU, empresa encargada del manejo de los RSU en diferentes zonas de Francia, la zona metropolitana de Paris entre ellas; además del manejo de residuos de la industria para algunas empresas; se realiza un muestreo semanal como mínimo. El manejo de que se encarga TIRU, incluye la recolección, transferencia y disposición final.

El muestreo se lleva a cabo con el fin de llevar un control de los RSU y se analiza su composición. Todos los análisis son efectuados in situ:

- a) Toma de muestra: Se considera una muestra representativa aquella con volumen de 1.6 m^3 que es aproximadamente del 10 al 12 % de la capacidad de un vehículo de recolección, extraídas de diferentes zonas del mismo; y por lo menos 3 muestras diferentes son tomadas.
- b) Clasificación: La muestra se coloca en una banda de separación, y personal con capacitación en el modo operativo de análisis la controla. Los productos segregados se colocan en recipientes individuales y son pesados con una precisión de 50 g.

Uno de los objetivos principales del análisis de composición es conocer los errores de separación que cometen los habitantes; ya que se cuenta



con un servicio de colecta de residuos específico de acuerdo a sus componentes (orgánicos, plásticos, cartón y papel, etc.)

El muestreo de RSU dentro del área metropolitana de Paris es una actividad que se encuentra dentro de las actividades típicas del manejo de residuos sólidos en esta zona, por lo que las instalaciones de manejo de RSU brindan grandes ventajas a la hora de clasificar en subproductos las diferentes muestras tomadas, además de que la toma de muestra es una operación cotidiana tanto para operadores de vehículos como para el personal capacitado para dicha actividad. (ALCYON Conseil en Systèmes d' Information 2006).

1.3.3.3. México

En nuestro país no se cuenta con una normatividad oficial en materia de muestreo de residuos sólidos, pero se cuenta con normas no obligatorias (NMX) relacionadas a dicha actividad, ver Tabla 1. 8. Tales normas contienen indicaciones en cuanto a la toma de muestra, su homogenización, y su análisis tanto en sitio como en laboratorio.

Tabla 1. 8 Normatividad mexicana relacionada al muestreo de RSU.

Norma	Nombre completo
NMX-AA-061-1985	Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales – “Determinación de la Generación”
NMX-AA-015-1985	Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales - Muestreo – Método de Cuarteo
NMX-AA-019-1985	Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales – Determinación de Peso Volumétrico “IN SITU”



Norma	Nombre completo
NMX-AA-022-1985	Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales – Selección y Cuantificación de Subproductos
NMX-AA-052-1985	Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales – Preparación de Muestras en Laboratorio para su Análisis

- a) Muestreo: De acuerdo a dicha normatividad, el muestreo debe realizarse por zona, de manera que sea representativa de los estratos socioeconómicos presentes. Dicho muestreo se hace por 8 días. Dependiendo del nivel de precisión deseado es que se determina el tamaño de muestra que, en este caso, lo constituye un número determinado de casas, de las cuales se toma una muestra y los resultados se reportan de acuerdo al número de habitantes y el estrato al que pertenecen. (SEMARNAT 1985) Dicho método se realiza con el objetivo de tomar una muestra de RSU en la etapa de generación.
- b) Homogenización: El método de cuarteo es el utilizado para la homogenización y toma de muestras de los RSU para: su caracterización en laboratorio, su determinación de peso volumétrico y cuantificación de subproductos. Consiste en verter los residuos previamente muestreados en un área de 4 x 4 m, posteriormente palearlos con el fin de mezclarlos completamente y dividir el cuadro en 4 sectores de 1 x 1 m, de donde son eliminados 2 de los 4 sectores, que se encuentren en contraesquina; para posteriormente ser paleados de nuevo y



repetir la operación hasta dejar un mínimo de 50 kg para realizar la cuantificación de subproductos. De las partes eliminadas en el primer cuarteo se toman 10 kg para análisis de laboratorio. (SEMARNAT 1985)

- c) Análisis in situ: La cuantificación de subproductos y la determinación de peso volumétrico son realizados en el sitio de muestreo. Para determinar el peso volumétrico se toma una parte de los residuos eliminados en el primer cuarteo y se llena un tonel metálico de 200 L, previamente pesado, para una vez lleno ser pesado; y el valor se obtiene dividiendo el peso obtenido entre el volumen conocido del recipiente. (SEMARNAT 1985) De acuerdo a una clasificación específica, se seleccionan y segregan los subproductos de la muestra de 50 kg, tomados de una de las partes procedentes del cuarteo; y posteriormente son pesados y reportados como el contenido de los residuos en porcentaje másico. (SEMARNAT 1985)

La normatividad mexicana no es aplicable en su totalidad porque busca identificar y caracterizar RSU en diferente etapa a la concerniente al presente estudio, además de contener ciertos procedimientos o especificaciones arcaicas. La principal disyuntiva para realizar un muestreo de residuos sólidos respecto a dichas guías es que se busca conocer las características de la corriente de residuos con destino a disposición final y mediante la normatividad mexicana sólo se conseguiría caracterizar la corriente proveniente directamente de la generación.



Haciendo una comparación entre las distintas guías y normatividades, en materia de muestreo, la normatividad mexicana con el paso de los años se ha vuelto obsoleta, no abarcando ciertas áreas de interés o distintas corrientes de residuos diferentes a la generación; mientras que la normatividad internacional en gran parte de los casos no es aplicable, en su totalidad o en baja proporción, debido a las diferencias tanto en la gestión de los residuos como en las características operacionales de sus sitios de manejo.

1.3.4. Características a determinar

1.3.4.1. Composición de subproductos

Los materiales que constituyen generalmente una corriente de RSU, son numerosos y de naturaleza muy diferente, por lo que es necesario conocer su composición para empezar a definir sus características.

1.3.4.2. Peso volumétrico

Es el término usado para referirse al volumen que ocupa cierta cantidad másica de RSU, en otras palabras su densidad. En cuanto a la caracterización de RSU la densidad es un parámetro muy útil, que brinda información para predecir un volumen de almacenaje. Varía en base a la composición, humedad, forma física y grado de compactación de la corriente. El rango en el que se encuentra generalmente el peso volumétrico de una corriente sin procesar de RSU es de 115 a 180 kg/m³. (Pichtel 2005)



1.3.4.3. Análisis elemental

Como se ha mencionado anteriormente, un tratamiento térmico, puede ser una gran opción para tratar los residuos del D. F. Tales tratamientos generarán ciertas emisiones, por lo que es necesario conocer la composición de dichos gases de salida. Estimar la composición de los gases de salida es posible mediante balances de materia y determinando los productos de las reacciones que ocurran en el tratamiento, por lo que es necesario conocer la composición química de las materias primas, los RSU. El presente estudio no se enfoca a dar tratamiento a los residuos orgánicos pero un parámetro útil en tal caso podría ser la relación Carbono Nitrógeno (C/N) que puede utilizarse como indicador en la producción de composta.

1.3.4.4. Humedad

Conocer el valor del contenido de humedad en RSU, es útil para estimar la cantidad de calor que se recuperará a partir de ellos, ya que si el contenido en humedad es alto mucha energía será consumida en eliminar el agua. Además la humedad debe ser tomada en cuenta para diseñar los requerimientos necesarios para su transporte. Como se ha mencionado anteriormente los tratamientos térmicos son muy comunes, y la cantidad de agua presente en los RSU presentan una dificultad para su adecuación a los mismos ya que generalmente debe eliminarse.

1.3.4.5. Cenizas

El contenido de cenizas en una corriente de RSU, es un factor importante a considerar para el diseño de un tratamiento térmico y debe ser considerado para sus emisiones, ya que en caso de que los residuos



típicos a alimentar tengan un alto contenido de cenizas, el tren de tratamiento de emisiones a la atmosfera tendría que considerarlo en su diseño.

1.3.4.6. Poder calorífico

Como se ha establecido anteriormente, la combustión de residuos para la disminución de su volumen y generación de energía eléctrica forma parte de los tratamientos térmicos de disposición final de RSU, los cuales se plantean como las principales alternativas en un futuro próximo.

Un aspecto fundamental en este tipo de tratamientos es la generación de energía eléctrica; de manera que es importante conocer la energía que se puede obtener de los residuos sólidos. El poder calorífico es un concepto que se maneja en este aspecto atribuyéndole la energía que se libera del proceso de combustión de los residuos; y generalmente se clasifica en 2 tipos:

- a) Poder calorífico inferior: Este valor es atribuible a la energía calorífica obtenida de la combustión de residuos tomando en cuenta la energía perdida en la vaporización del contenido de agua presente.
- b) Poder calorífico superior: El valor energético que representa es el que se atribuye únicamente a la combustión de los residuos y presenta un valor más alto al poder calorífico inferior.

En los procesos térmicos se busca reducir el volumen de los RSU mediante su combustión, ya sea en presencia baja, alta o completa ausencia de oxígeno. El fenómeno de combustión se explica como la



reacción de oxidación de una sustancia en presencia de una flama a CO_2 Y H_2O (cuando los compuestos contienen C, H y O) y dicha transformación es por lo general de carácter exotérmico, lo que provoca la generación de luz y calor. (Umland y M. 2000)

Cuando ocurre una transformación química cierta cantidad de energía es consumida o liberada, resultado de la diferencia de energía entre productos y reactivos; a dicha diferencia de energías se le llama energía de reacción.

El principio de la generación de energía eléctrica a partir del tratamiento térmico de los RSU es la recuperación de calor y su posterior aprovechamiento. La energía que se recupera en un proceso de tratamiento térmico de residuos se da en forma de calor, y corresponde a las entalpías de combustión debido a las condiciones en que se llevan a cabo. Los cambios de entalpía están definidos por:

$$dH = dU + d(PV)$$

$$dH = dU + PdV + VdP$$

Para un proceso que se lleva a cabo a presión constante, se elimina el término diferencial de presión. Sustituyendo el término diferencial de energía interna:

$$dU = dq - PdV$$

$$dH = dq - PdV + PdV$$

por lo que se puede decir que los cambios de entalpía son iguales a la energía calorífica liberada o consumida durante un proceso a presión constante:

$$dH = dq \quad (\text{a } P=\text{cte.})$$



de manera que a la energía liberada o consumida en la constitución de una sustancia se le llama entalpía de formación (ΔH°_f), y se le define como cambio en la entalpía que ocurre en el proceso en que se pasa isotérmicamente de las sustancias iniciales en estados normales a una sustancia producto a condiciones normales. También se le llama energía o entalpía de reacción (ΔH°_r) al calor intercambiado al realizarse una reacción.

Una combustión no es excepción para los cambios de energía mencionados, se les llama energía estándar de combustión, o calor estándar de combustión ($\Delta H^{\circ}_{\text{comb}}$), y se le define como energía térmica liberada cuando se quema una mol de sustancia en un exceso de oxígeno, estando todos los reactivos y productos en sus estados estándar. (Atkins 1991)

El principio por el que se mide generalmente el $\Delta H^{\circ}_{\text{comb}}$ es mediante una bomba calorimétrica, donde se mide el cambio en la temperatura provocado por la combustión de una sustancia determinada. Esto se hace cuando se conoce la sustancia con la que se experimenta y la única variable es su temperatura. Pero en este estudio, el poder calorífico, ha sido determinado mediante un método en que se mide la energía liberada o consumida durante un periodo determinado, a una tasa de calentamiento fija.

El poder calorífico promedio de los RSU en bruto es de 11,650 kJ/kg (Pichtel 2005) lo que los convierte en un material adecuado para los procesos térmicos. Se espera encontrar un valor similar para los RSU del D. F. y que el comportamiento de los mismos consista en dos curvas positivas (ganancia de energía), a diferentes temperaturas, la más baja



representaría el contenido de cartón y papel además de otros materiales que contengan celulosa, y la segunda, que probablemente no será regular, indicará el aporte de los materiales plásticos que se espera sea mayor al que será obtenido de los materiales a base de celulosa.

1.3.5. Corriente de residuos a estudiar y lugar de muestreo

El principal problema en la gestión de residuos del D. F. es que su relleno sanitario correspondiente, Bordo Poniente, llegan toda la fracción destinada a disposición final y ha estado llegando a su máxima capacidad desde hace algunos años por lo que se encuentra en planes de cierre. Siendo, en agosto de 2008, establecida como fecha de cierre el 19 de enero de 2009. (SEMARNAT 2008)

Gran parte de esa corriente corresponde a RSU, aproximadamente 13,000 ton diarias de residuos provenientes del D. F. y Estado de México, mismos que incluyen residuos orgánicos e inorgánicos como plástico, cartón y papel; sin tomar en cuenta otro tipo de desecho como los hospitalarios o de lodos de desecho que también son almacenados en Bordo Poniente. Dicha corriente puede identificarse, en el D. F., como aquella que va de las estaciones de transferencia, las plantas de selección y las plantas de composta, con destino al relleno sanitario.

Se ha elegido estudiar la corriente de residuos con destino a disposición final debido a su problemática actual, además de que al contener materiales combustibles, principalmente de la fracción inorgánica, constituyen una materia prima adecuada para alternativas tratamiento térmico.



Debido a que de las estaciones de transferencia parten aquellos residuos con destino a disposición final constituyen el lugar idóneo para el muestreo ya que se podría obtener una muestra representativa de los residuos que son enviados a disposición final, en el caso del Distrito Federal al relleno sanitario Bordo Poniente, y que representan las diferentes zonas de la ciudad. Además dichos lugares presentan mejores condiciones de trabajo, ya que una toma de muestra en el relleno sanitario implicaría un ambiente de trabajo con menor cantidad de áreas seguras y se podría correr el riesgo de obstruir el funcionamiento de las unidades de trabajo.



2. Metodología de Muestreo y caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

2.1. Planeación

A continuación se describen las actividades que fueron necesarias para definir la metodología de muestreo (Figura 2. 1), la cual inició con la investigación y consulta de normas internacionales y nacionales, tanto para el muestreo como los procedimientos para el posterior análisis y caracterización de RSU.

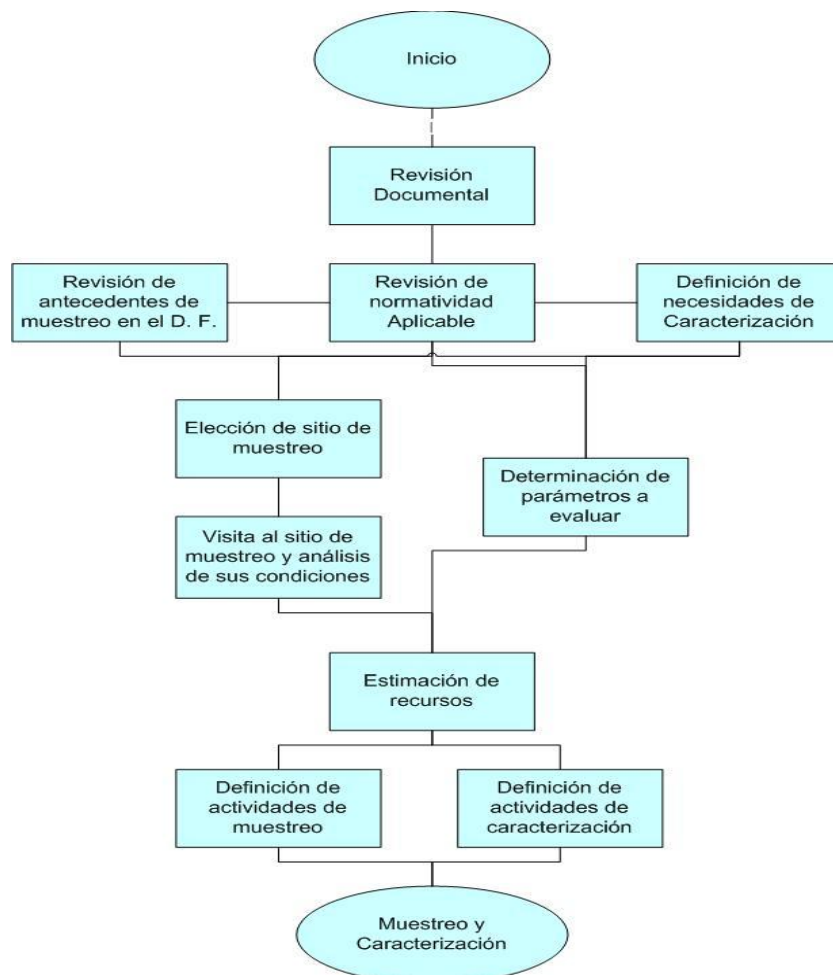


Figura 2. 1 Metodología de planeación



Para definir la muestra y el lugar donde se obtuvo también fue necesario pensar en las necesidades que debía satisfacer la caracterización. Una vez elegido el sitio de muestreo se hizo una visita de reconocimiento para evitar dificultades operacionales en la toma de muestra, así como definir áreas de trabajo. En paralelo se analizaron los parámetros a evaluar en la muestra, tomando en cuenta la normatividad existente y las necesidades de caracterización del estudio.

Como siguiente paso fue necesario estimar los recursos, tanto humanos como materiales. De manera que se pudiera conformar el equipo de trabajo y adquirir los materiales necesarios en las diferentes tareas. Finalmente fueron definidas las tareas específicas para cada actividad con lo que se pudo dar inicio a la caracterización y muestreo de los RSU D. F.

Ciertas actividades de la planeación consistieron en la revisión de documentos por lo que han sido incluidas en el capítulo anterior, de la misma manera que la definición de la corriente de estudio y el sitio de muestreo; finalmente otras de análisis como la definición de los parámetros a evaluar han sido colocadas en el capítulo anterior.

2.2. Muestreo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal en las 13 estaciones de transferencia

Para el presente estudio fue elaborada una nueva metodología, adaptada tanto de las normas nacionales como internacionales, para satisfacer los requerimientos del estudio así como las necesidades operativas y los recursos disponibles. A continuación se describen los diferentes pasos necesarios para realizar el estudio.



2.2.1. Determinación del tamaño de muestra

Para determinar un tamaño de muestra representativo se realizó un análisis estadístico de la muestra:

- a) Definición de la muestra: Los RSU son un material heterogéneo por lo que se puede considerar como principal variable su composición, es posible decir que los datos a obtener (composición) resultan "continuos" ya que existe un infinito número de posibilidades entre 0 y 1 en cuanto a la fracción másica de los materiales constituyentes de los RSU. Los valores de los datos se distribuyen, en cuanto a su probabilidad, de una forma normal y estándar o regular; dependiendo de la media poblacional y la desviación estándar poblacional.
- b) En el caso de los RSU del Distrito Federal se ha partido de la composición promedio previa a este estudio, correspondiente al estudio realizado por la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA) en 1999. Los valores mencionados han sido tomados como una media, pero no se cuenta con un dato de la desviación estándar de dichos datos, por lo cual una distribución "t de Student" ha sido útil para describir la muestra obtenida. Otra característica importante de este tipo de distribución es que el tamaño de muestra representativo no depende del tamaño de la población (n); sino más bien del nivel de confianza deseado, del margen de error deseado y del valor de la desviación estándar como se muestra a continuación:



$$n = \left[\frac{t * s}{e * \mu} \right]$$

n = tamaño de muestra

t = estadístico t correspondiente al nivel de confianza deseado

s = desviación estándar estimada

e = nivel de precisión deseado.

μ = media estimada

- c) Cálculo de tamaño de muestra: Fue tomado como una guía para estimar un tamaño de muestra de RSU, el método empleado en la norma ASTM D5231-92, pero sin seguirla al pie de la letra debido a que los valores reportados en ella, para la composición media de los RSU y su desviación estándar, no son representativos del universo a caracterizar en el presente estudio.
- d) Para definir el tamaño de muestra han sido usadas medias poblacionales de la composición de nuestro universo, pero su desviación estándar no es conocida; razón por la que se ha utilizado una distribución "t" para describir la composición de los residuos. Recordando que para cierto grado de confiabilidad existe un valor de "t"
- e) Para una confiabilidad del 90% ($e=1.0 - 0.9$) el valor de $t = 1.645$ para una muestra con n desconocida. El componente en mayor proporción son residuos de alimentos, con una media de 0.2889 (Cabrera Delgado 2010). En casos donde no se conoce la desviación, puede seguirse un método heurístico: la "regla práctica del intervalo" donde $\sigma = \text{intervalo}/4$. De manera que el



valor para t fue obtenido de una tabla donde t es función de la confiabilidad, por lo que el valor de confiabilidad resultó en $\sigma = 1/4$ siendo que la media puede tener un valor entre 0 y 1. De manera que el tamaño de muestra fue calculado de la siguiente manera:

$$n = \left[\frac{t * s}{e * x} \right] = \left[\frac{(1.645)(0.25)}{(0.1)(0.2889)} \right] = 14.23$$

Ahora ajustando t para una muestra de 14, se tiene que $t = 1.771$, entonces:

$$n = \left[\frac{t * s}{e * x} \right] = \left[\frac{(1.771)(0.25)}{(0.1)(0.2889)} \right] = 15.32$$

Por lo que fueron muestreados un total de 15 camiones por estación de transferencia.

2.2.2. Toma de muestra

Una vez en el sitio de muestreo, y de haber preparado un área de trabajo, se eligieron al azar los camiones a muestrear eligiendo uno de entre tres o cinco camiones en función de acuerdo con la afluencia de vehículos recolectores en cada estación de transferencia, tomando en cuenta empezar el muestreo por la mañana y terminar después del mediodía para poder obtener muestras provenientes de mercado o de tiraderos clandestinos las cuales llegan a las estaciones por la mañana y domiciliarias que empiezan a llegar a media mañana. Al camión recolector seleccionado se le toma una muestra de los RSU, tomado los residuos del suelo o de la tolva de descarga; y colocándolos en contenedores de aprox. 200 L para después transportar los RSU al área de trabajo, se registra el peso de cada muestra a través de una báscula



y se depositan en la superficie destinada para efectuar su homogenización. La muestra compuesta fue constituida con residuos de un peso total de aproximadamente ½ tonelada y el procedimiento puede consultarse de manera más detallada en el Ver Anexo 1.

2.2.3. Homogenización

Este procedimiento se realizó con el fin de que la muestra total de RSU tuviera la misma composición, de manera que al retirar una pequeña parte de la misma resultara representativa. Su metodología fue basada en la normatividad mexicana NMX-AA-015-1985 "Método de cuarteo", concerniente al método para homogenizar una muestra de residuos sólido. Consistió en palear los residuos de manera que la composición fuera uniforme en toda el área de trabajo y dividirla en 4 partes diferentes de una composición similar y puede ser consultada a detalle en el Anexo 3.

2.3. Caracterización de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal.

Una vez que se cuenta con una muestra representativa de la corriente de estudio es posible definir sus características, como se hizo en el presente estudio. Los procedimientos, para algunas determinaciones fueron realizados en el lugar de muestreo, y para otras en laboratorio.

2.3.1. Determinación de subproductos (composición)

Para realizar la Selección y cuantificación de los RSU de cada estación, se utilizó un procedimiento y una lista de subproductos propuesta por la norma "NMX-AA-022-1984; Selección y cuantificación de subproductos". Aunque no todos los subproductos se encontraron presentes en la



muestra compuesta se trató de separar, durante el desarrollo de la actividad, la mayor cantidad de subproductos en ella además de otros que no estaban incluidos fueron anexados, con el fin de obtener la información necesaria para cuantificar los diversos tipos de residuos que ingresan a la estación. La presente determinación se realizó en el lugar de muestreo.

Para realizar la cuantificación de subproductos fue tomado un mínimo de 50 kg de la muestra total por sitio de muestreo, para después ser colocada en una mesa y ser separada en los diferentes subproductos a partir de la lista de clasificación de materiales mencionada. Los materiales fueron pesados en una balanza analítica y su peso fue registrado para cada uno de los componentes. Se puede observar el procedimiento con detalle en el Anexo 6.

2.3.2. Peso volumétrico

La determinación de peso volumétrico fue realizada en el sitio de muestreo, y se basa en la normatividad mexicana "NMX-AA-019-1985 Peso Volumétrico in situ" con algunas modificaciones. Dicho procedimiento consistió en tomar fracciones proporcionales de los cuatro cuartos en los que se divide la muestra compuesta al homogenizarla, tal y como lo indica la norma, los cuales fueron incorporados al interior de un contenedor de aprox. 200 L. Con el fin de tener una mayor diversidad de residuos y que la densidad no variara en intervalos de más de 3 kg por determinación se realizó una maniobra de asentamiento de los residuos para que finalmente fuera pesado el contenedor lleno en la báscula de piso registrando el valor obtenido. (Ver Anexo 4).



2.3.3. Análisis elemental

La cantidad de C, H, O, N y S fue determinada mediante un Analizador Elemental modelo EA/NA1110 de la marca Fison, el cual basa su funcionamiento en la combustión de la muestra a aprox. 1000 °C, en una atmósfera de oxígeno y cuantificando en porcentaje másico los componentes mediante los gases productos de su combustión: CO₂, H₂O y N₂. El procedimiento de análisis es descrito en el Anexo 5.

2.3.4. Humedad

Esta determinación se realizó en el laboratorio, y el procedimiento está basado en la norma mexicana "NMX-AA-016-1984, Determinación de humedad". El procedimiento consistió en triturar y homogenizar cada una de las muestras obtenidas en aproximadamente 12 kg, para que posteriormente se redujera en tamaño a un máximo de 5 cm. De esta mezcla homogénea se tomó una muestra representativa de aproximadamente 15 a 30 g la cual fue colocada en un una charola de aluminio. La muestra fue colocada en la estufa a 120 °C durante un periodo de 1 a 3 hrs. Finalmente se tomó el peso de la muestra seca y la cantidad de humedad se obtuvo mediante diferencia de pesos. El procedimiento completo se encuentra descrito en el Anexo 7.

2.3.5. Cenizas

El procedimiento seguido para esta determinación fue tomado de las recomendaciones presentes en la norma mexicana "NMX-AA-018-1984 Determinación de cenizas en residuos sólidos municipales", para ello fue necesario el acondicionamiento del procedimiento. Los cambios consistieron principalmente en minimizar el tamaño de muestra a fin de



reducir los riesgos que pudiera provocar la combustión de la muestra, proceso necesario en la determinación de cenizas. Fue aplicado un procedimiento previo de secado y pulverización, posteriormente se tomó entre 1.5 y 4 g de muestra seca colocándolos en crisoles de porcelana para calcinar cada muestra en una parrilla a 300°C (573 K), hasta que cesara la generación vapores y humo; a continuación se procedió con una segunda etapa de calcinación de los residuos utilizando una mufla a 800°C (1073 K) por 1 hora. Una vez que los crisoles y la muestra llegaron a la temperatura ambiente, fue registrado su peso. El procedimiento completo se encuentra desarrollado a fondo en el Anexo 8.

2.3.6. Entalpía o calor de combustión (poder calorífico)

La presente determinación fue realizada mediante un análisis calorimétrico diferencial de barrido con un equipo DSC 1 de Mettler Toledo el cual, mediante un flujo de calor que está relacionado con la temperatura, puede registrar una curva de la energía liberada o consumida durante la elevación de la temperatura de una muestra en presencia de oxígeno.

El calorímetro opera calentando de 3 a 5 mg de la muestra en crisoles de aluminio de 40 microlitros hasta una temperatura máxima de 500°C, manteniendo el flujo de oxígeno y tasa de calentamiento constantes. El procedimiento de la presente determinación es explicado a detalle en el Anexo 9.

El aparato mide la temperatura y registra los valores de la energía aplicada a la muestra para elevar su temperatura, y puede apreciarse en un termograma donde se grafica la potencia específica suministrada a la



muestra en W/g contra temperatura o tiempo. A través de un módulo matemático de integración, que contiene el software de operación del equipo, se determina el calor de combustión de la muestra. En la Figura 2. 2 se muestra un ejemplo típico de un termograma de combustión, con una curva positiva lo que indica la liberación de energía durante el proceso.

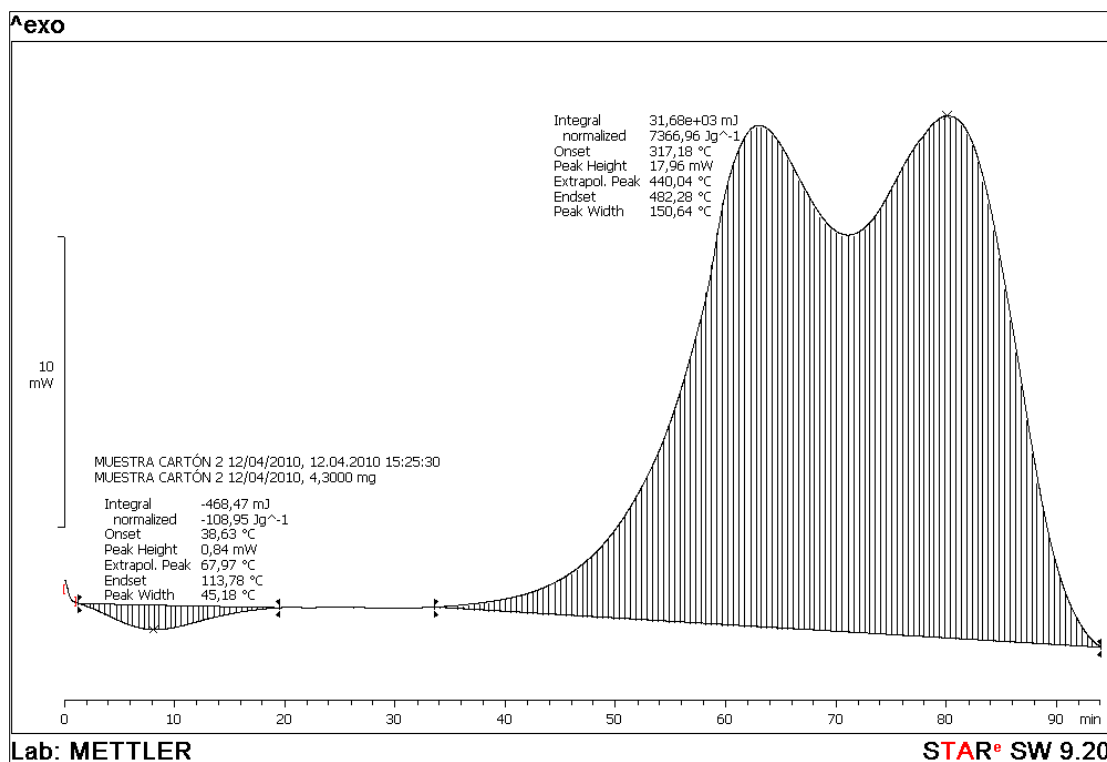


Figura 2. 2 Termograma de una muestra de cartón



3. Resultados

El muestreo de los RSU fue realizado en un periodo de 3 semanas del 20 de noviembre al 10 de diciembre de 2009. Las muestras se obtuvieron en cada una de las 13 estaciones de transferencia del D. F.; y la mayor parte de ellas corresponden a la fracción de mezcla enviada a disposición final, su confinamiento en el relleno sanitario Bordo Poniente, y en menor proporción enviadas a las plantas de selección, además de una pequeña parte de residuos orgánicos enviados a las plantas de composta. Las muestras que fueron utilizadas para la determinación de sus características fueron clasificadas en 3 tipos:

- Fracción de mezcla: Está constituida por residuos orgánicos e inorgánicos que corresponden a todas las muestras tomadas de camiones que descargan en las tolvas clasificadas como inorgánicas (cartón, plásticos, etc.) y contienen dichos materiales además de toda aquella fracción orgánica que no es separada desde su origen.
- Fracción orgánica de tolva: En esta clasificación entran las muestras tomadas de las estaciones de transferencia en las que se realiza una separación de residuos orgánicos para ser enviados a las plantas de composta, y los constituyen principalmente residuos de poda y de mercados.
- Fracción orgánica de mezcla: Este tipo de muestras fueron obtenidas después de realizar la clasificación de subproductos, y a ella corresponden todos aquellos residuos orgánicos no separados desde su generación.



A continuación (Tabla 3. 1) se muestran las 13 Estaciones de Transferencia, junto con las condiciones termodinámicas que se encontró puntualmente el día de muestreo en cada una de ellas.

Tabla 3. 1 Condiciones termodinámicas ambientales durante el muestreo

Estación de Transferencia	T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)	T _{BH} (°F)	T _{BS} (°F)	% Humedad
ÁLVARO OBREGÓN	16	20.5	60.8	68.9	35
AZCAPOTZALCO	16	18.4	60.8	65.12	60
BENITO JUAREZ	13	18.5	55.4	65.3	15
COYOACÁN	14.5	18.9	58.1	66.02	55
CUAUHTÉMOC	15.5	20.5	59.9	68.9	36
GUSTAVO A. MADERO	15	18.9	59	66.02	45
IZTAPALAPA I	14.5	17.9	58.1	64.22	43
IZTAPALAPA II	13	18.3	55.4	64.94	12
MIGUEL HIDALGO	12	15.3	53.6	59.54	35
MILPA ALTA	14	22	57.2	71.6	8
TLALPAN	14	21	57.2	69.8	14
VENUSTIANO CARRANZA	12.8	19	55.04	66.2	18
XOCHIMILCO	16	21.15	60.8	70.07	30

Los resultados mostrados en el presente trabajo son los correspondientes al análisis de las muestras de la fracción mezcla debido a que uno de los objetivos del mismo es proponer alternativas a la gestión de los residuos en su etapa final: la disposición. En las diferentes determinaciones se muestran promedios ponderados a partir del flujo de residuos transferido en cada estación, y que se muestra en el Anexo 1, de manera que es un promedio representativo de los residuos en el D. F.



3.1. Peso volumétrico

En la Tabla 3. 2 se muestran los resultados de la determinación de peso volumétrico promedio, obtenido de la muestra compuesta de RSU por estación de transferencia. Los datos presentados fueron generados a partir de dos ensayos, con excepción de la E.T. Tlalpan, en la cual sólo se realizó una sola determinación.

Tabla 3. 2 Peso volumétrico de la fracción mezcla.

Estación de Transferencia	Peso Volumétrico (kg/m ³)	
	Fracción mixta	Fracción orgánica
Álvaro Obregón	145.7	-
Azcapotzalco	146.1	335
Benito Juárez	182.4	-
Coyoacán	152.4	373
Cuauhtémoc	147.7	413
G.A.M.	166.9	353
Iztapalapa I	232.3	-
Iztapalapa II	288.0	491
Miguel Hidalgo	200.3	-
Milpa alta	160.0	-
Tlalpan	192.9	396
Venustiano Carranza	201.4	-
Xochimilco	145.7	339
Promedio ponderado	185.9	-



El valor promedio para los RSU del D. F. es de 185.9 y oscila en un intervalo de 146.1 a 288 kg/m³. A pesar de que no fue obtenida una medición de peso volumétrico de la fracción orgánica, contenida en la fracción mezclada, se puede observar que tienen valores mayores que una fracción compuesta de orgánicos e inorgánicos; por lo que se puede afirmar que la cantidad de residuos orgánicos contenidos en una muestra aumentan el valor del peso volumétrico, y se espera que aquellas muestras con altos valores de peso volumétrico tengan un alto contenido de residuos orgánicos.

3.2. Composición

A continuación se muestra la composición de los RSU del D. F. de acuerdo a 2 criterios de clasificación. El primero es por subproductos y en él se muestra el contenido en porcentaje másico de materiales mayoritarios y sin procesar, como lo son el cartón, plásticos y residuos orgánicos. El segundo criterio es producto del análisis elemental en que se especifica el contenido por elementos (C, H, O, N y S), además de su contenido de cenizas; todo ello en base húmeda.

3.2.1. Subproductos

La Tabla 3. 3 muestra la composición en cada estación de transferencia de los RSU del D. F. A partir de la información reportada en el inventario de residuos sólidos del Distrito Federal (Gobierno del Distrito Federal 2008) y la presente tabla se estimó el flujo de RSU que ingresan a cada estación con sus correspondientes subproductos (ver Anexo 1).

Tabla 3. 3 Composición de los RSU en el D. F.

Material	Álvaro Obregón	Azcapotzalco	Benito Juárez	Coyoacán	Cuauhtémoc	Gustavo A. Madero	Iztapalapa 1 (C. A.)	Iztapalapa 2	Miguel Hidalgo	Milpa Alta	Tlalpan	Venustiano Carranza	Xochimilco	Promedio	Desviación Stdr.
Cartón	3.84	3.28	5.95	3.03	2.93	3.00	1.27	1.57	2.26	5.55	5.64	2.82	2.75	2.93	1.57
Cuero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08
Hueso animal	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09
Lata de aluminio	0.15	0.13	0.25	0.42	0.09	0.22	0.30	0.08	0.47	0.00	0.00	0.00	0.15	0.20	0.15
Loza y cerámica	0.51	1.12	0.00	1.71	0.00	0.39	0.08	0.78	0.00	5.49	0.00	1.55	0.96	0.72	1.51
Madera	1.09	1.14	0.34	0.37	0.50	0.19	0.28	0.20	0.14	0.70	0.38	0.00	0.08	0.45	0.35
Material de construcción	0.46	4.69	0.00	0.00	0.00	0.46	3.55	4.53	0.00	4.47	0.00	0.77	0.00	1.87	1.98
Material eléctrico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.29
Material ferroso	0.00	0.94	1.49	1.67	0.75	2.36	0.83	1.66	1.07	0.80	1.10	1.09	1.37	1.16	0.57
Material no ferroso	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.34
Pañal des./ toallas sanitarias	5.56	3.15	9.50	4.08	1.94	6.37	5.86	1.92	4.78	15.98	9.11	6.69	9.57	5.05	3.93
Papel aluminio	0.16	0.24	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.43	0.00	0.09	0.13
Papel de impresión	1.09	3.44	2.05	1.47	4.45	1.16	0.93	0.95	1.39	1.01	0.65	1.10	2.68	1.76	1.11
Papel de revista	1.20	0.43	0.98	1.34	0.49	0.26	0.61	0.23	1.34	2.28	0.00	1.97	0.46	0.79	0.70
Papel encerado	0.00	0.00	0.89	1.24	0.09	0.00	0.00	1.42	1.16	1.32	0.00	0.00	0.00	0.44	0.60
Papel sanitario	5.77	6.59	0.89	1.70	9.58	8.46	4.94	5.11	5.62	6.84	6.94	7.29	7.57	5.72	2.40
Otros Papeles	0.84	1.53	1.32	0.00	2.64	0.00	1.88	0.00	1.33	0.00	0.00	1.35	1.81	1.00	0.87
Periódico	1.34	1.67	2.97	1.34	2.47	2.93	1.64	1.65	1.06	0.85	3.15	1.53	1.87	1.82	0.76
Plástico N-1 PET	1.11	1.60	2.15	0.89	1.51	0.75	0.63	0.20	2.38	1.70	3.22	1.47	1.06	1.21	0.84
Plástico N-2 PEAD	0.44	1.70	1.54	0.84	0.78	0.58	1.24	1.10	2.01	1.97	1.91	2.35	0.91	1.20	0.63
Plástico N-3 PVC	0.17	0.32	0.21	0.38	0.17	0.11	0.00	0.02	0.06	0.46	0.18	0.25	0.04	0.17	0.14
Plástico N-4	0.28	0.35	0.55	0.61	0.27	0.99	0.25	0.50	0.25	0.60	0.28	0.61	0.19	0.43	0.22



Como se puede apreciar en el Gráfico 3. 1 casi la mitad de los desechos con destino a disposición final son de naturaleza orgánica (49.5%), también fue encontrada una cantidad considerable (1.42%) de residuos que necesitan un manejo especial, además de materiales de construcción (2.59%); los últimos dos no deberían encontrarse dentro de la composición típica de los RSU.

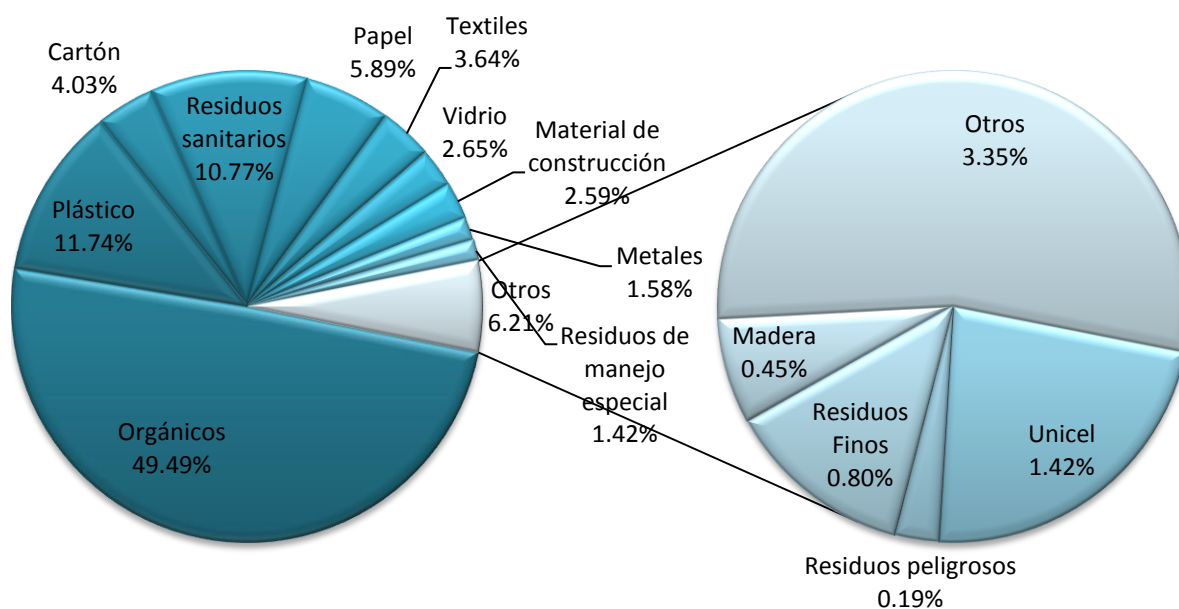


Gráfico 3. 1 Composición general de los RSU del D. F.

Otro aspecto a resaltar es que poco más del 20% de los materiales presentes constituyen una fracción combustible (papel, cartón y plásticos), por lo que los tratamientos térmicos serían una buena opción para su disposición final; lo cual será esclarecido una vez se determine la energía que se puede obtener de una corriente de RSU típica en el D.F.



Otro aspecto a resaltar es el cambio que han sufrido respecto a sus componentes y su último estudio que corresponde al elaborado por la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA) en 1999. En la Tabla 3. 4 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio (2009) y la composición reportada por JICA. (JICA 1999)

Tabla 3. 4 Composición actual y último estudio elaborado.

Material	Composición		
	Estudio actual	JICA	Diferencia
Cartón	4.03	8.59	4.56
Madera	0.45	1.27	0.82
Material de construcción	2.59	2.44	0.15
Metales	1.58	4.29	2.71
Papel	5.89	9.37	3.48
Plástico	11.74	8.55	3.19
Orgánicos	49.50	40.88	8.62
Textiles	3.64	4.07	0.43
Residuos de manejo especial	1.42	-	-
Residuos sanitarios	10.77	7.55	3.22
Residuos peligrosos	0.19	0.09	0.1
Vidrio	2.65	7.23	4.58
Unicel	1.42	0.58	0.84
Residuos Finos	0.80	1.71	0.91
Otros	3.35	3.38	0.03
Total	100.00	100.00	

Los principales cambios corresponden a la disminución de papeles, vidrio y cartón y al aumento de plásticos en la composición de los desechos. Otra discrepancia es el contenido en orgánicos que ha resultado mayor en la presente determinación.



En el Gráfico 3. 2 se observa que los residuos que presentan una mayor cantidad de residuos orgánicos, provienen de la E.T. Iztapalapa II, sin embargo la distribución permite observar que existe una cantidad de residuos orgánicos similar, en las estaciones que no reciben alta afluencia de camiones recolectores de residuos orgánicos provenientes de mercado o de la central de abastos.

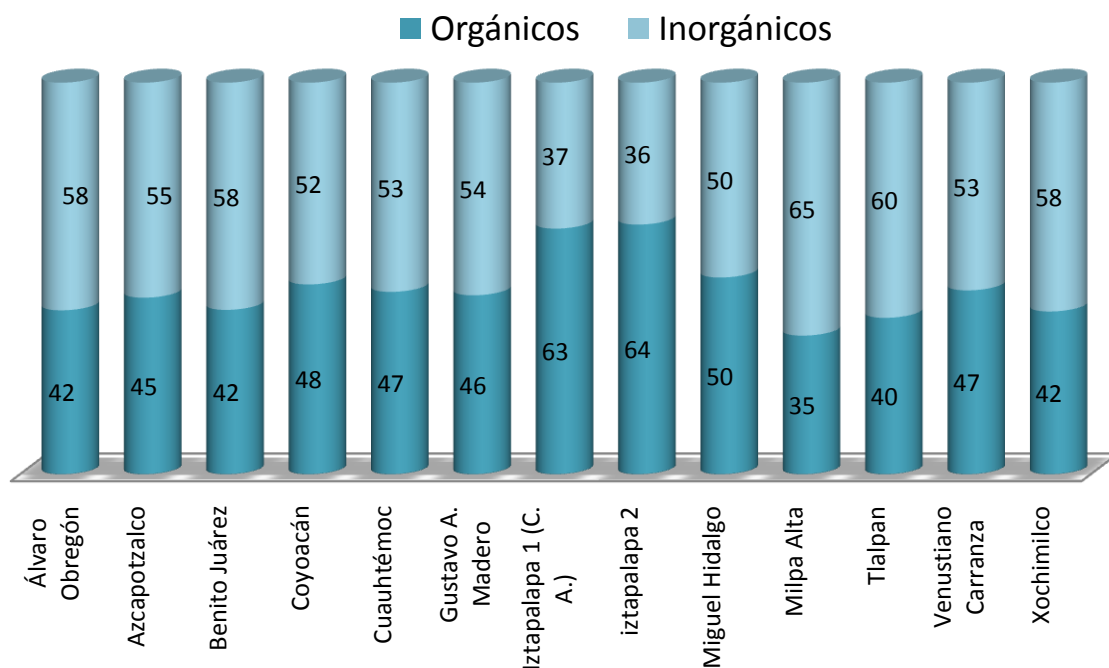


Gráfico 3. 2 Orgánicos e Inorgánicos presentes en la fracción mixta de los RSU en el D. F.

La gran cantidad de residuos orgánicos, como de manejo especial o residuos peligrosos sugieren un cambio en la separación desde el origen, para que dejen de figurar dentro de la composición típica de los RSU del D. F. y faciliten el manejo de los mismos.



3.2.2. Elemental

A continuación (Tabla 3. 5) se presenta la composición de los RSU del D. F., tomando en cuenta sus principales componentes: C, H, O, N y S, además de su contenido en humedad y en cenizas. Se presentan los resultados de las determinaciones por punto de muestreo y además un promedio ponderado de acuerdo a los flujos de residuos, como se ha venido haciendo en las otras determinaciones.

Tabla 3. 5 Composición elemental, humedad y cenizas. (% másico)

ET	%Cenizas	%Humedad	%C	%H	%O	%N	%S
Álvaro Obregón	14.54	32.83	38.98	6.68	2.18	4.78	0.00
Azcapotzalco	13.09	23.92	48.00	12.06	2.33	0.60	0.00
Benito Juárez	6.80	13.60	64.45	12.74	1.06	1.35	0.00
Coyoacán	10.57	34.40	31.03	12.96	9.87	1.17	0.00
Cuauhtémoc	11.46	32.27	20.93	1.05	34.27	0.03	0.00
G.A.M.	15.80	33.36	36.14	8.39	5.85	0.46	0.00
Iztapalapa I	11.15	32.55	40.73	12.49	0.41	2.55	0.12
Iztapalapa II	17.47	20.48	43.52	12.73	0.69	5.10	0.00
Miguel Hidalgo	14.67	17.68	48.37	11.00	6.14	2.14	0.00
Milpa Alta	14.68	32.78	38.97	10.77	1.65	1.15	0.00
Tlalpan	11.37	28.22	41.14	8.61	9.42	1.25	0.00
Venustiano Carranza	12.61	23.68	40.45	13.97	8.66	0.63	0.00
Xochimilco	13.36	26.69	44.84	10.30	4.25	0.58	0.00
Promedio Ponderado	13.04	27.86	39.96	10.39	6.76	1.98	0.01

Los RSU del D. F. presentan, en su fracción mezcla, un alto contenido de carbono siendo la ET de Benito Juárez la que presenta un mayor porcentaje másico (64.45) y Cuauhtémoc la de menor (20.93). Otro



aspecto importante es el bajo contenido de azufre, lo cual sugeriría menores dificultades en el tren de limpieza en el efluente de emisiones a la atmósfera en caso de usarse un tratamiento térmico para la disposición final de los residuos. De manera que la formula general de los RSU del D. F. es:



El contenido de C, N, y S puede servir como base para simular o calcular la cantidad de emisiones de gases considerados contaminantes que pueden efectuarse de algún tratamiento de disposición final.

3.2.3. Contenido de Humedad

A continuación (Gráfico 3. 3) se presentan los valores correspondientes al contenido de humedad de las muestras correspondientes a la fracción mezcla, que es enviada a disposición final.

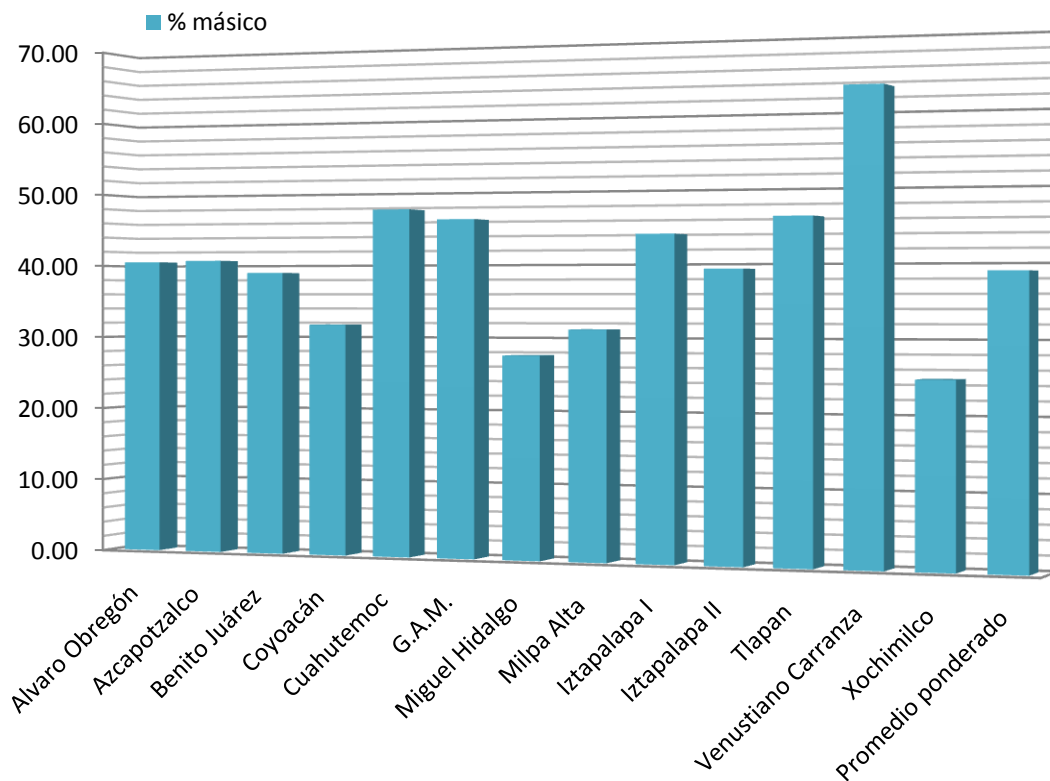


Gráfico 3. 3 Humedad por Estación de Transferencia.

Como fue supuesto en un principio, las estaciones con mayor cantidad de residuos orgánicos presentaron a su vez la mayor cantidad de humedad. Los residuos correspondientes a la ET Iztapalapa II mostraron el mayor contenido de orgánicos y a su vez de humedad.

El contenido de agua presente en los residuos separados de la tolva orgánica se encuentra entre el 66.9 y 79.5%, mientras que su parte orgánica en su mayoría está constituida por residuos como cascara de fruta, desechos de florerías, residuos de poda de jardinerías, residuos de alimentos, plumas, y en una pequeña fracción residuos de productos alimenticios animales (vísceras, etc.).



Para poder describir de mejor forma la fracción mezcla, fue determinada su humedad tanto para su contenido orgánico como para toda la muestra y se puede apreciar en el Gráfico 3. 4.

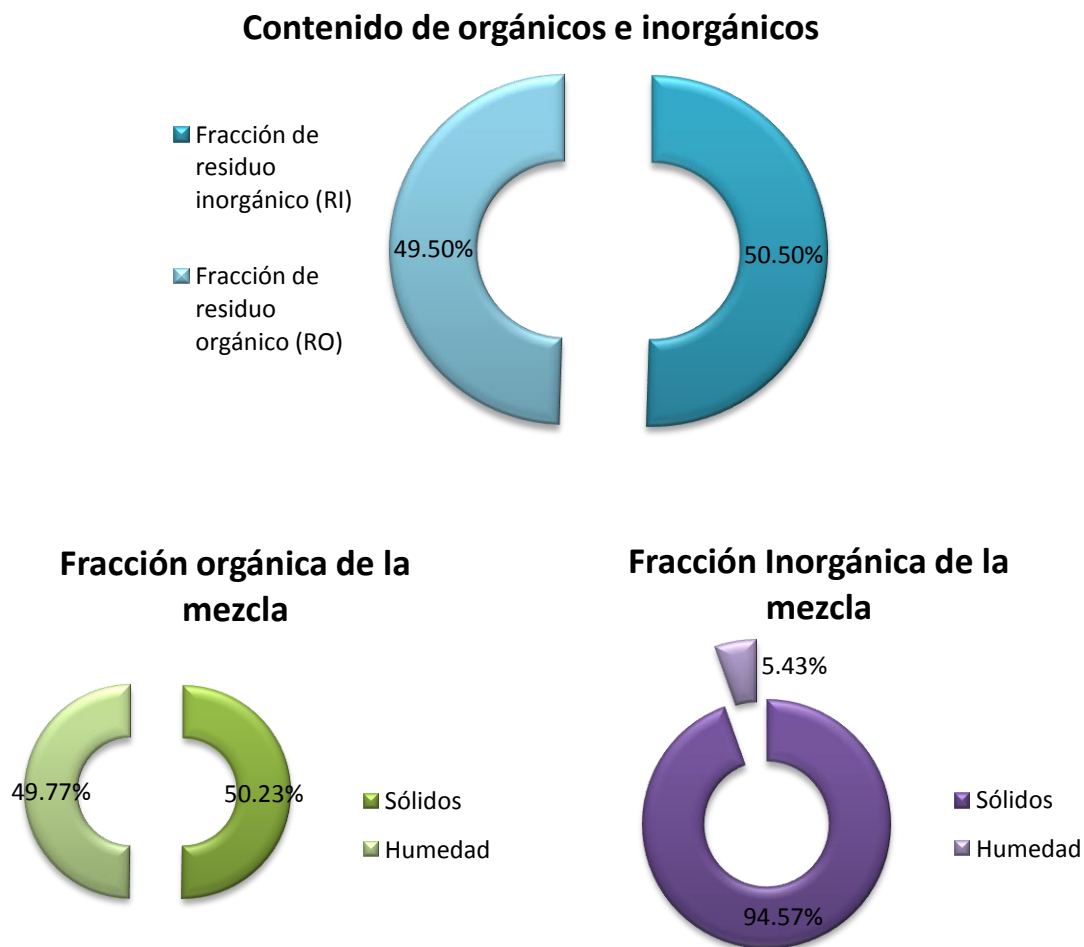


Gráfico 3. 4 Humedad en las fracciones orgánica e inorgánica de los RSU del D. F.

El gráfico anterior muestra la humedad contenida tanto en la parte orgánica como en la parte inorgánica de la fracción mezcla de los RSU del D. F. En caso de separar los residuos orgánicos de la fracción mezcla



se eliminaría aproximadamente el 50% en peso de los RSU, y con ello el 90% de la humedad en los mismos.

3.2.4. Contenido de cenizas

A continuación (Gráfico 3. 5) se muestra el contenido de cenizas en las muestras correspondientes a la fracción mezcla de cada Estación de Transferencia.

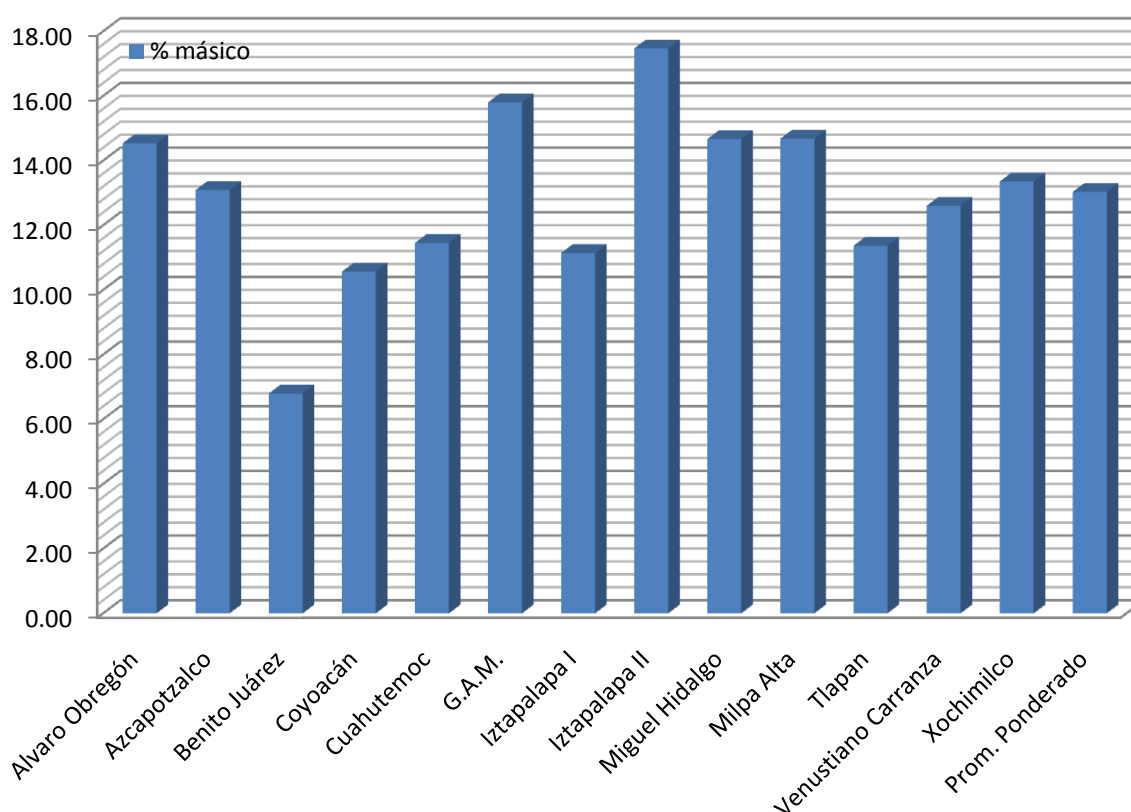


Gráfico 3. 5 Contenido de cenizas por Estación de Transferencia.

El contenido en cenizas general es del 13%, dato que puede servir en estudios posteriores, y en simulaciones de procesos de combustión en la disposición final de los RSU para calcular los residuos que puedan ser producidos mediante los mismos.



3.3. Calor de combustión

En el Gráfico 3. 6 se muestra como ejemplo el termograma de curvas obtenidas para las muestras representativas de la estación de transferencia Iztapalapa 1, fueron obtenidas curvas similares para las muestras restantes correspondientes a las otras 12 estaciones de transferencia. En las curvas se aprecia un primer pico de liberación de energía, con su punto más alto alrededor de los 310 °C, lo que se atribuye a la presencia de material celulósico como cartón o papel (Reh, y otros 1986); seguido de otra serie de picos que constituyen una segunda elevación de energía atribuible a materiales plásticos y con su punto de inflexión alrededor de los 460 °C.

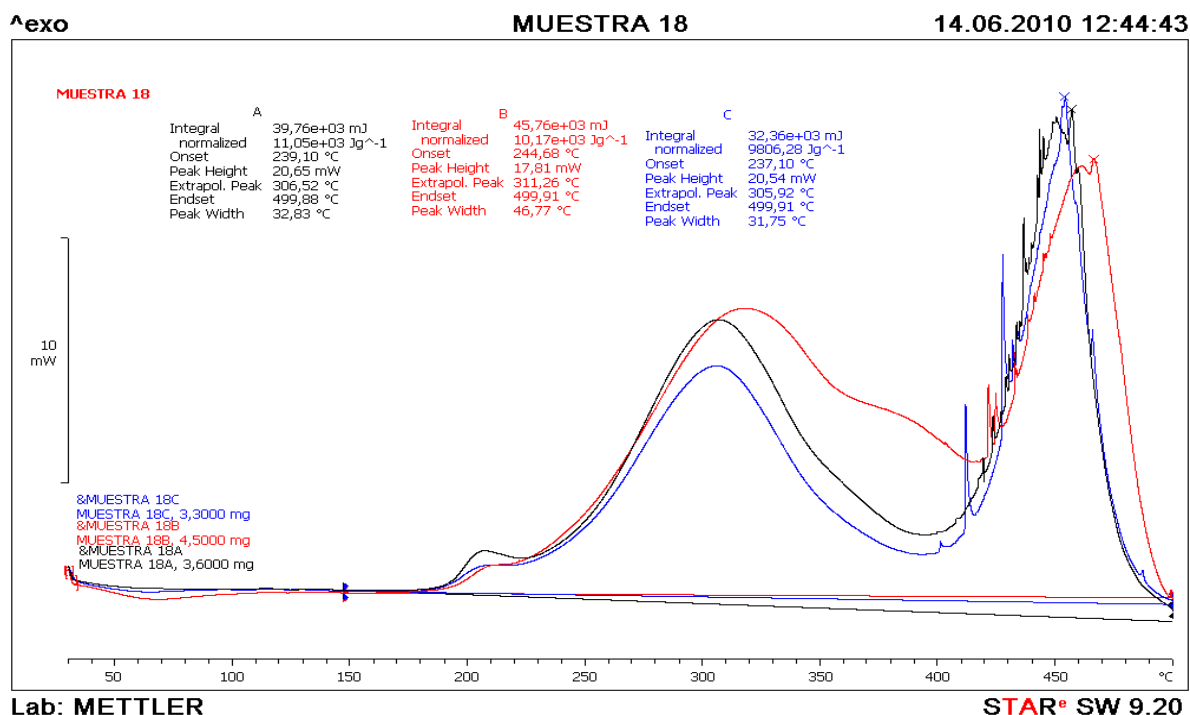


Gráfico 3. 6 Termograma de combustión de ET Iztapalapa I.



En la Tabla 3. 6 se muestran los valores obtenidos para el calor de combustión de las muestras representativas de cada una de las 13 estaciones de transferencia en el D. F. con su respectivo análisis estadístico y un promedio ponderado en base al flujo transferido en cada estación.

Tabla 3. 6 Calor de combustión por ET (kJ/kg)

Estación de Transferencia	Promedio	Desviación Estándar	%V
Álvaro Obregón	10342.00	522.22	5.05
Azcapotzalco	11090.00	632.30	5.70
Benito Juárez	12203.33	1124.79	4.28
Coyoacán	10743.33	420.26	3.91
Cuauhtémoc	10043.33	202.04	2.01
G.A.M.	9654.70	246.66	2.55
Iztapalapa I	10700.00	269.94	2.52
Iztapalapa II	11430.00	332.37	2.91
Miguel Hidalgo	14006.67	294.09	2.10
Milpa Alta	9525.38	344.68	3.62
Tlalpan	11500.00	868.83	7.56
Venustiano Carranza	9651.30	1102.99	4.53
Xochimilco	12023.33	1430.95	4.20
Prom. Ponderado	10921.84	-	-

El valor atribuible a los RSU del D. F. (10,921.84 kJ/kg) se encuentra muy cercano al valor del papel (11,200-18,000 kJ/kg) (Pichtel 2005), y el bajo porcentaje de variación indica la constitución de un buen método de análisis de determinación de calor de combustión. En este caso se habla de un poder calorífico superior al no tomar en cuenta la energía que sería consumida al evaporar el contenido de agua.



En el Gráfico 3. 7 se muestra una comparación del valor de PC resultante del análisis calorimétrico de los RSU del Distrito Federal con los valores a los que operan las plantas de gasificación: Karlsruhe de Alemania que cuenta con tecnología Thermoselect, la planta de Ebara en Kawaguchi, Japón; la planta de incineración de Ivry en Paris; además de los valores de combustibles como el carbón o el gas natural.

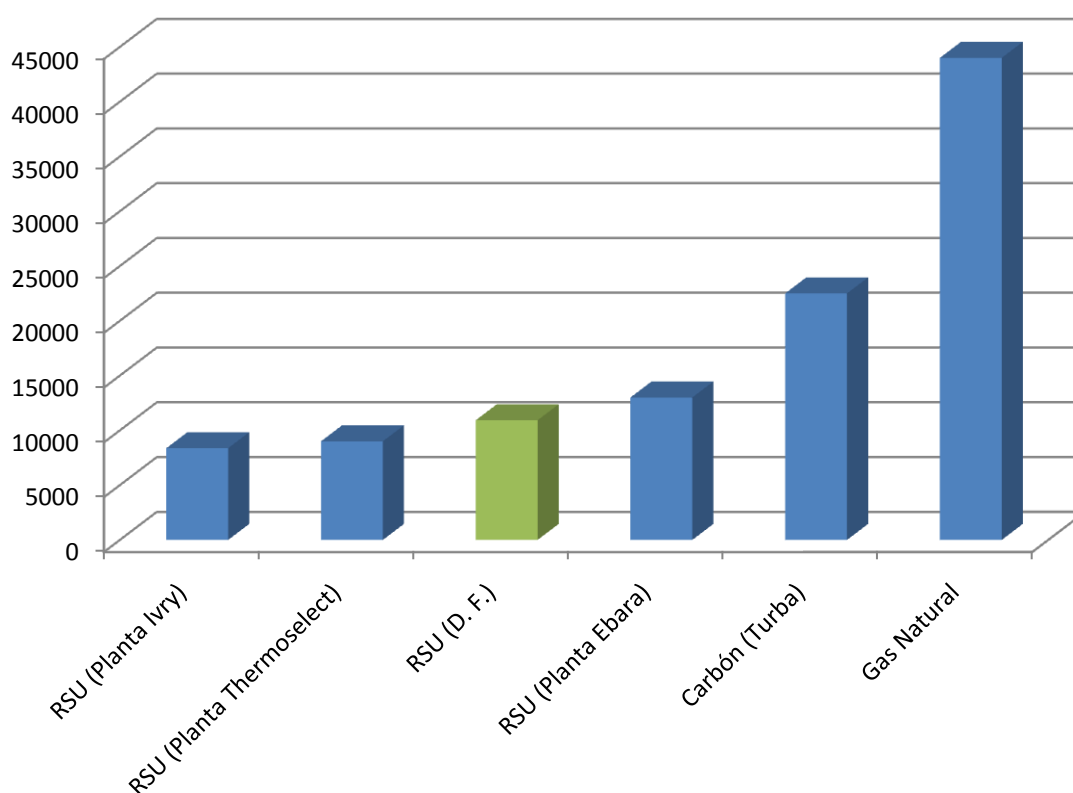


Gráfico 3. 7 Comparativo de valor de PC (kJ/kg)

(Sáez Torrecilla 1995), (Tchobanoglous y Kreith 2002), (Cabrera Delgado 2010) y (TIRU 2003)



4. Proyecciones de los Residuos Sólidos Urbanos en el D. F. de acuerdo a su composición

A continuación se presentan escenarios posibles de los RSU en el D. F. en los próximos 5 años, siendo las principales variables la separación de residuos orgánicos y el cambio en la tasa de recuperación de materiales reciclables. Dichos escenarios han sido planteados tomando en cuenta el crecimiento de la población en base a proyecciones del Consejo Nacional de población (CONAPO), y la tasa de generación de residuos mediante datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); además de los cambios contemplados por el Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Distrito Federal.

4.1. Cambios en la tasa de generación de RSU

En el Gráfico 4. 1 se presenta la proyección del crecimiento poblacional, elaborada por CONAPO, que tiene un comportamiento diferente al que se pensaría con un aumento constante. Pero hay que recordar que el crecimiento de una población se ve limitada por la disponibilidad de recursos.

De acuerdo al Banco Mundial una tasa de crecimiento es un concepto utilizado en una metodología para generar datos estadísticos. Generalmente las tasas de crecimiento son calculadas mediante series cronológicas de datos, principalmente por el modelo de mínimos cuadrados, el modelo de crecimiento exponencial o el modelo de crecimiento geométrico. (Grupo del Banco Mundial 2010)

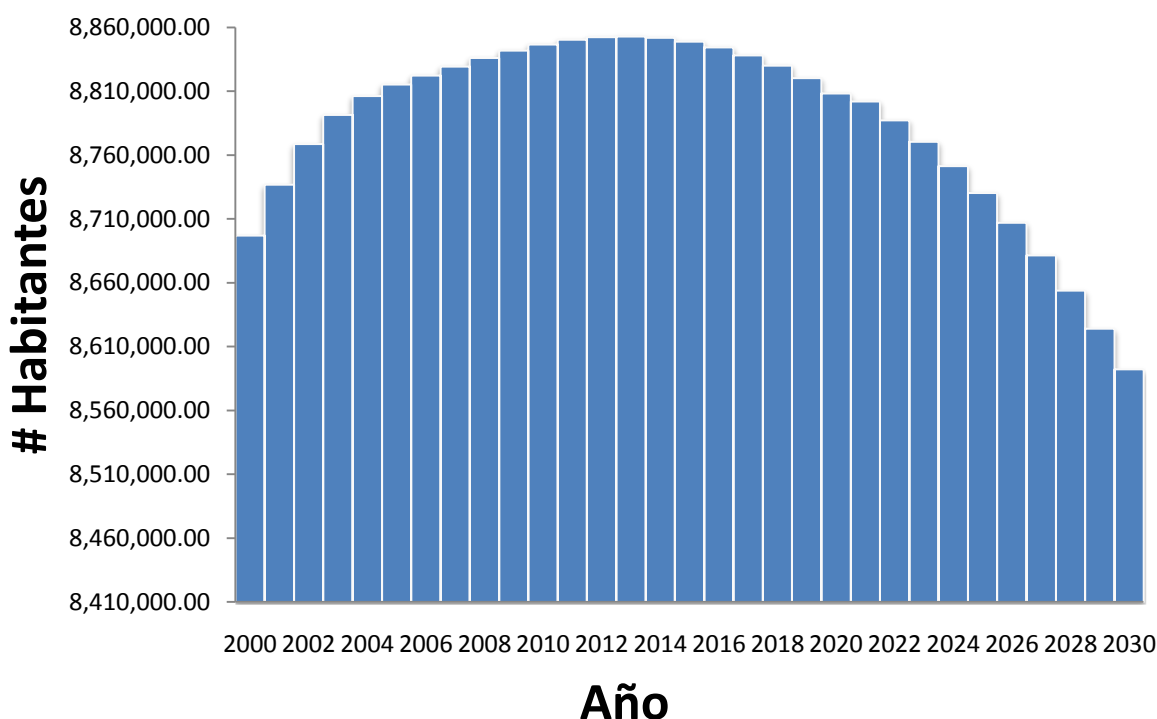


Gráfico 4. 1 Crecimiento poblacional en el Distrito Federal

(Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva 2005)

Mediante datos recopilados por INEGI de generación de residuos ha sido calculada una tasa de crecimiento de generación per cápita de RSU, a partir de la cual se han realizado proyecciones de generación de residuos. Los datos mencionados comprenden la generación anual de residuos de 2000 a 2008 en el D. F. (INEGI 2008). No fueron utilizados los datos reportados por el GDF debido a que los registros con que cuenta son reportados a partir de 2006.

La tasa de crecimiento de generación per cápita de residuos ha sido calculada mediante una fórmula de tasa de crecimiento geométrica (Grupo del Banco Mundial 2010) tomando en cuenta un periodo de 8



años donde se toman en cuenta los datos más recientes de generación. El cálculo se muestra a continuación:

$$r = \exp\left(\ln\left(\frac{P_n}{P_1}\right)/n\right) - 1$$

Donde:

P_n = generación per cápita de RSU al año n

P_1 = generación per cápita de RSU al año 1

n = el intervalo en que se calculará la tasa, a 8 años (2000 a 2008)

La tasa de crecimiento de generación per cápita de residuos se espera de:

$$r = \exp\left(\ln\left(\frac{1.47}{1.37}\right)/8\right) - 1 = 0.0089$$

La tasa de crecimiento de generación per cápita de RSU ha sido utilizada para hacer proyecciones de generación de RSU en un periodo de 5 años. Este es el tiempo necesario para implementar un programa de separación de residuos desde su origen, siendo mayor que el que prevé el GDF que para implementar su plan de separación para finales del año 2010 (Gobierno del Distrito Federal 2009). Finalmente ha sido calculada la generación per cápita, como cociente de los residuos generados y la población en el D. F., para cada uno de los años que comprende la proyección. La proyección completa se muestra en la Tabla 4. 1.



Tabla 4. 1 Estimado de la generación de RSU en el D. F.

Año	Población (Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva 2005)	Generación per cápita (kg hab ⁻¹ día ⁻¹)	Generación anual de residuos (ton)	Generación diaria de RSU (ton)	Residuos transferidos (ton/día)
2007	8,829,423	1.44	4,650,100	12,740	12,190
2008	8,836,045	1.47	4,745,000	13,000	12,439
2009	8,841,916	1.49	4,790,420	13,124	12,558
2010	8,846,752	1.52	4,835,708	13,249	12,677
2011	8,850,343	1.54	4,880,735	13,372	12,795
2012	8,852,475	1.57	4,925,370	13,494	12,912
2013	8,853,026	1.60	4,969,524	13,615	13,028
2014	8,851,876	1.63	5,013,111	13,735	13,142
2015	8,848,995	1.65	5,056,091	13,852	13,255

A pesar de que se espera que de 2013 a 2014 el tamaño de la población en el D. F. disminuya, la generación de residuos por habitante se estima seguirá creciendo y con ello la cantidad total generada en el D. F. La última columna corresponde a la cantidad de RSU transferida, que ha sido la estudiada en el presente trabajo, y corresponde a una fracción de 0.9682 resultante del cociente del total de residuos transferidos y el total de residuos generados al día en 2008 en el D. F. (Gobierno del Distrito Federal 2008)

4.2. Cambios en la separación de la fracción orgánica

Actualmente el Programa para gestión integral de los residuos sólidos para el Distrito Federal (PGIRS-DF) plantea un decremento en la



cantidad de residuos que son enviados a almacenamiento como disposición final y un cambio en las características de los mismos, que deben ser estimadas con la finalidad de identificar la cantidad de residuos que serían susceptibles de ser tratados mediante diversos tratamientos (Gobierno del Distrito Federal 2009).

En el Gráfico 4. 2 se muestra la generación de residuos mezclados, en la que se puede observar la disminución de contenido de orgánicos y el decrecimiento de residuos mezclados.

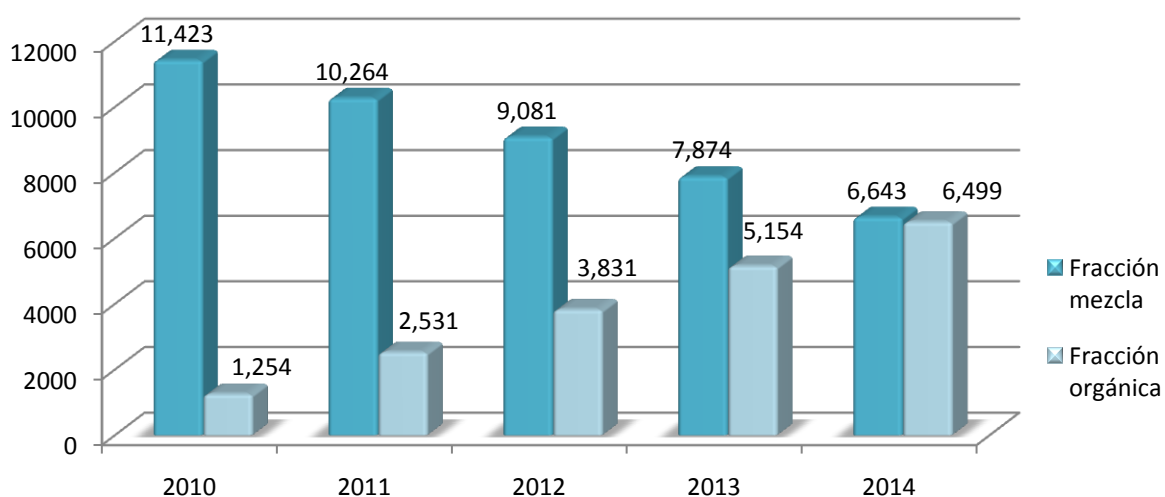


Gráfico 4. 2 Proyección de separación de residuos orgánicos

Hay que aclarar que el PGIR del D. F. no ha sido aprobado aún pero fue publicado desde noviembre de 2009 y plantea como una de sus metas la completa separación de residuos orgánicos e inorgánicos para finales del 2010, dentro de su programa de separación desde fuente. En el presente estudio se plantea un escenario donde se aumente gradualmente la separación en un 20% anual para lograr la completa



separación en 2014, y del cual se espera una generación de residuos orgánicos e inorgánicos muy similar, menor a 6,500 ton/día.

4.3. Cambios en la tasa de reciclaje

Existen diferentes factores que podrían cambiar la composición de los RSU del D. F. debido al incremento o decremento en el reciclaje de algunos de los materiales presentes en los mismos. El PGIR para el D. F. tiene como una de sus metas tener un sistema de reciclaje específico para 2011, el cual plantea que para el primer trimestre de 2011 se separen 500 toneladas de reciclables en las plantas de selección y posteriormente mejorar la calidad de recuperación y aumentar a 1200 toneladas diarias.

En el Gráfico 4. 3 se muestra el aumento gradual de residuos a ser reciclados, además de la disminución de la fracción mezclada, debido a la separación de residuos orgánicos, con lo que también disminuiría el total de residuos para disposición final.

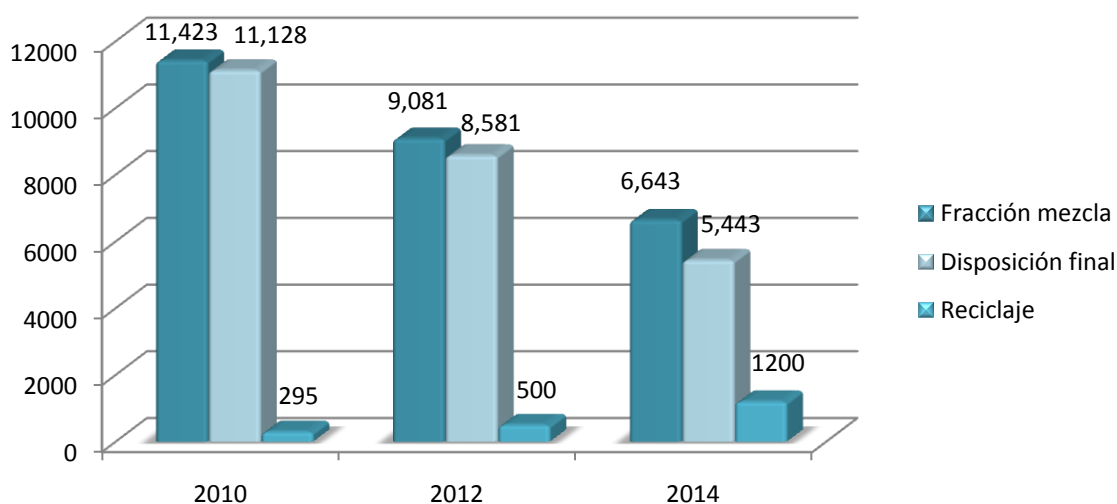


Gráfico 4. 3 Fracciones de disposición final



Una vez realizados los programas de reciclaje y separación en fuente, quedará una cantidad considerable de residuos para disposición final (5,281 ton/día).

En el Gráfico 4. 4 se muestra la composición de los residuos sólidos en el D. F. que resultaría de aplicar la separación de orgánicos e inorgánicos en fuente, además de la reducción de materiales reciclables por su recuperación en las plantas de selección.

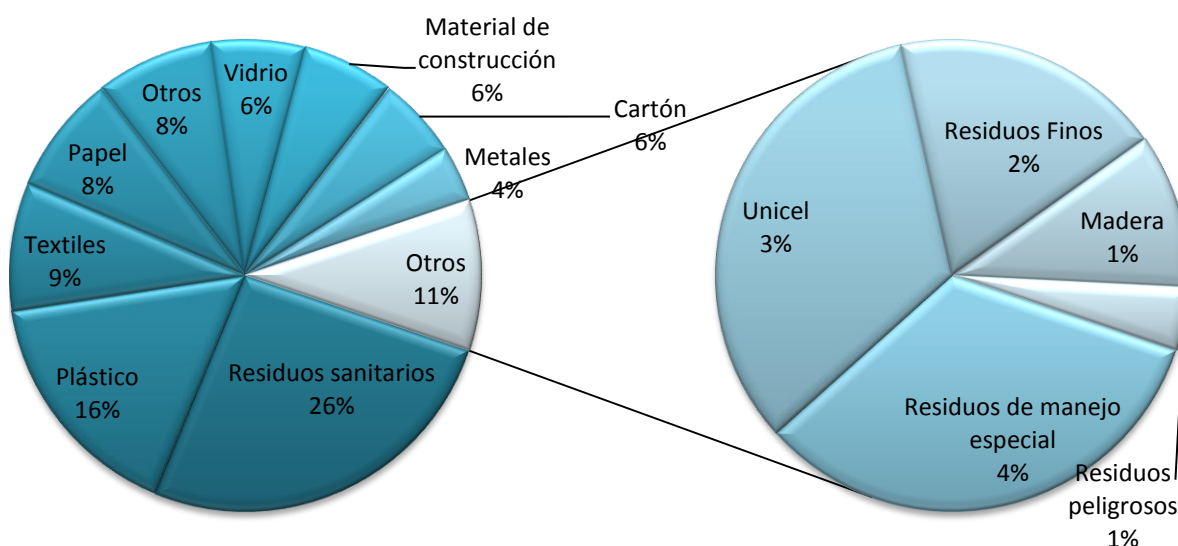


Gráfico 4. 4 Composición futura de los RSU del D. F.

La composición presente correspondería a las 5,281 toneladas diarias para disposición final. Se puede observar una gran cantidad de plásticos y otros materiales combustibles como papel y cartón. En el gráfico resulta muy evidente la necesidad de mejores planes de manejo y un mejor control de los residuos de la construcción, los cuales tiene como meta el PGIRS del D. F.



5. Conclusiones.

Los RSU del D. F. presentan como componentes mayoritarios: residuos orgánicos 49.5%, seguidos de materiales reciclables o combustibles (plásticos 11.74% papel 5.89% y cartón 4.03%) además de 28.84 de materiales de rechazo. En caso de realizarse la separación de la fracción orgánica de los residuos, la fracción resultante sería una mezcla de residuos con un alto contenido de componentes con capacidad a ser reciclados o utilizados en otro proceso.

El contenido de humedad en los RSU es de 27.86% en masa (mínimo 17.68% en Miguel Hidalgo y máximo 34.40% en Coyoacán), del cual el 24.61% es atribuible a residuos orgánicos. Además fueron encontrados 2.59% de materiales de construcción, 1.42% de residuos de manejo especial (4.01% como máximo en Azcapotzalco y 0.31% como mínimo en Miguel Hidalgo) y 0.19% de residuos peligrosos; lo que muestra una necesidad de aplicación de programas de manejo con el fin de eliminarlos de la corriente de disposición final.

El peso volumétrico promedio de los RSU del D. F. resultó de 185.9 kg/m³ (mínimo de 145.7 en Xochimilco y Álvaro Obregón, y máximo de 288 en Iztapalapa II). El peso volumétrico disminuiría con la separación de orgánicos, ya que el peso volumétrico de los residuos orgánicos es mayor (353-491 kg/m³).

En el análisis calorimétrico se obtuvo un calor de combustión ponderado para los RSU del D. F. de 10,921 kJ/kg, con lo que se obtendría un aporte considerable de energía; no el suficiente como para sustituir a un combustible pero si lo suficiente para hacer viable un proyecto de tratamiento térmico de residuos. El comportamiento de flujo de energía



típico de una muestra de RSU del D. F. es presentar un primer pico con su punto más alto a una temperatura aproximada de 330°C y una posterior serie de picos con su punto más alto a una temperatura de 460°C; ambas curvas indican liberación de energía, la primera es atribuible a material celulósico y la segunda a materiales plásticos.

Se espera una tendencia creciente de generación de residuos, y en caso de lograr la completa separación de residuos orgánicos e inorgánicos se producirá una cantidad similar para cada una, aproximadamente 6500 toneladas al día por lo que se presentan 2 escenarios diferentes de condiciones de disposición para las fracciones orgánica e inorgánica:

- a) Fracción orgánica: En el caso de que se logre una recolección separada de residuos para el año 2014, 6,499 toneladas de residuos orgánicos tendrían que ser tratadas diariamente. Esta cantidad sobrepasa la capacidad de las plantas de composta que se tienen en la actualidad, por lo que es importante tener alternativas para la disposición de esos desechos tales como la composta ciudadana o tecnologías de procesamiento térmico
- b) Fracción inorgánica: En 2014 podría generarse un estimado de 6,643 ton de residuos inorgánicos al día, en caso de que se haga una separación de residuos desde su fuente; de los cuales se tiene pensado recuperar 1200 toneladas de materiales reciclables. Dicha cantidad es mucho menor a la que se destina actualmente a disposición final y tendría una composición con mayor cantidad de papel, plástico y cartón, materiales con gran aporte calorífico en caso de optar por un tratamiento térmico de combustión.



Una de las mayores dificultades del presente estudio consistió en no encontrar guías adecuadas en el procedimiento de muestreo y caracterización de residuos sólidos. En la actividad de muestreo las principales complicaciones ocurrieron principalmente debido a que no se tiene una norma mexicana de muestreo adaptable a los sitios de manejo de residuos sólidos, y la normatividad internacional no es aplicable para la mayor parte de las condiciones en América Latina. Para la caracterización de los RSU pueden consultarse normas internacionales, que generalmente requieren de procesos y equipos especializados; por lo que se recomienda actualización de las NMX a equipos más modernos.

Es indispensable lograr la separación completa de la fracción orgánica para facilitar el manejo integral de los RSU en el D. F. Debido a que con ello disminuiría el contenido en humedad de los mismos, generando una menor cantidad de lixiviados y facilitando su transporte y manejo. Otro aspecto a considerar es que eliminando el agua aumentaría la cantidad de energía por unidad de masa que podría generarse en un proceso que involucre su combustión.

En caso de optar por un tratamiento térmico de combustión de los RSU se recomendaría un análisis de caracterización de las emisiones: determinaciones como: la tasa de combustión, contenido de hidrocarburos poliaromáticos y contenido de furanos como los principales análisis.



6. Referencias.

ALCYON Conseil en Systèmes d' Information. *Groupe TIRU*. 2006. <http://www.tiru.fr/> (último acceso: 12 de Enero de 2010).

ALCYONE. «TIRU.» Febrero de 2006. <http://www.tiru.fr/> (último acceso: 26 de 07 de 2009).

Atkins, Peter W. *Fisicoquímica*. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.

Bagchi, Amalendu. *Design of Landfills and Integrated Solid Waste Management*. 3ª. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2004.

Cabrera Delgado, Nayeli. *Tesis: Opciones de Tecnologías de conversión térmica para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. Ciudad de México, 2010.

Ching, Ni-Bin, y Eric y Davila. «Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas.» *Waste Management*, nº 28 (2008): 776-794.

Comité Europeo de Normalización. «Comité Europeo de Normalización.» 2010. <http://www.cen.eu/> (último acceso: 22 de Marzo de 2010).

Conseil Regional d'Île-de-France. «Plan Régional d'Élimination des déchets ménagers et assimilés.» Paris, 2009, 12.

Coordinación General para la Gestión de Residuos Sólidos. *Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos en Argentina*. 2009. http://www.ambiente.gov.ar/observatoriosu/informacion_general/estadisticas.html (último acceso: 05 de Enero de 2010).

Dirección General de Estudios Sociodemográficos y Prospectiva. «Consejo Nacional de Población.» 2005. www.conapo.gob.mx (último acceso: 27 de Abril de 2010).

Direction de la Propreté et de l'eau, Mairie de Paris. «Syndicat Intercommunal pour la Valorization et le Traitement de Residus Urbains.» 2006. <http://www.paris.fr> (último acceso: 05 de 01 de 2009).

European IPPC Bureau . *Integrated Pollution Prevention and Control. Draft Reference Document on the Best Available Techniques for Waste*



Incineration. Sevilla: Institute for Prospective Technological Studies, 2004.

Gidakos, E., G. Havas, y P. Ntzamilis. «Municipal Solid Waste Composition determination supporting the integrated solid waste management in the island of Crete.» *Waste Management*, nº 26 (Julio 2005): 668-679.

Gobierno del Distrito Federal. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal.» Ciudad de México, 2008.

—. «Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Federal.» *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. nº 710. Ciudad de México, 9 de Noviembre de 2009.

Greater London Authority. *City Solutions: new and emerging technologies for sustainable waste management*. Londres : Greater London Authority, 2003.

Grupo del Banco Mundial. *Banco Mundial*. 2010. <http://datos.bancomundial.org/quienes-somos/panorama/metodologias> (último acceso: 27 de Abril de 2010).

Himmelblau, David M. *Balances de Materia y Energía*. Naucalpan: Prentice Hall Hispanoamericana S. A., 1988.

Industrial, Secretaría de Comercio y Fomento. «Norma Mexicana NMX-AA-022-1985.» *Residuos Sólidos Municipales- Selección y Cuantificación de Subproductos*. Mexico D.F.: Dirección General de Normas, Secretaría de desarrollo Urbano y Ecología, 1985.

INEGI. «Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos.» Aguascalientes, 2008.

—. *INEGI*. 2000. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/default.aspx?tema=me&e=09> (último acceso: 18 de Noviembre de 2009).

—. «Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).» 2005. www.inegi.org.mx/ (último acceso: 29 de Enero de 2010).

JICA. «Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México.» Informe Final, Ciudad de México, 1999.



Malkow, Thomas. «Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal.» *Waste Management* (Elsevier), nº 25 (febrero 2003).

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. «Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd Submission to Greater London Authority City Solutions Stakeholders on MSW Management.» Inglaterra, 2003.

Organización Panamericana de la Salud. *Análisis del Manejo de Residuos en América Latina y el Caribe*. Publicación BID - OPS, 1998.

Organización Panamericana de la Salud. «Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales.» Organización Mundial de la Salud, 2002.

Pichtel, John. *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial*. Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group, 2005.

«Power plants around the world.» *Waste to energy plants in portugal and spain*. 28 de Junio de 2008. <http://www.industcards.com/ppworld.htm> (último acceso: 07 de 2009).

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. «Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.» *Diario Oficial de la Federación*. 19 de Junio de 2003.

Recycling, Mitsui. «Pyrolysis Gasification & Melting Process.» *R21 Projects Status as of May 20, 2003*. Mayo de 2003. http://www.ieabcc.nl/meetings/Tokyo_Joint_Meeting/02_Mitsui.pdf (último acceso: 08 de 2009).

Regional District of North Okanagan. «Final Report Waste-to-Energy Review of Alternatives.» 2009.

Reh, Ursula, Kraepelin, Gunda, y Lamprecht Ingolf. «Use of Differential Scanning Calorimetry for Structural Analysis of Fungally Degraded Wood.» *Applied and Environmental Microbiology* (American Society for Microbiology) 52, nº 5 (1986): 1101-1106.

S.N.M. Menikpura, B.F.A. Basnayak. «New applications of 'Hess Law' and comparisons with models for determining.» *Renewable Energy*, 2009: 1587-1594.



Sáez Torrecilla, Angel. *Prácticas de Termodinámica y Termotecnia*. Zaragoza: McGraw-Hill, 1995.

Scott, Jason, Donia Beydoun, Rose Amal, Gary Lowe, y Cattle y Julie. «Landfill Management, Leachate Generation, and Leach Testitng of Solid Wastes in Australia and Overseas.» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005: 239-232.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. «Guía para la Licitación y Concesión de Obras y Servicios en la Gestión Integral de Residuos Sólidos en México.» Ciudad de México, Abril de 2007.

SEMARNAT. «NMX-AA-015-1985.» *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - MÉTODO DE CUARTEO*. Ciudad de México, 1985.

—. «NMX-AA-016-1984.» *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE HUMEDAD*. Ciudad de México, 1984.

—. «NMX-AA-019-1985.» *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Ciudad de México, 1985.

—. «NMX-AA-022-1985.» *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Ciudad de México, 1985.

—. «NMX-AA-061-1985.» *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACION DE LA GENERACION*. Ciudad de México, 1985.

—. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 19 de Agosto de 2008.

<http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/noticias/boletindeprensa/Pages/bol08-%20161.aspx> (último acceso: 10 de Marzo de 2010).

Tchobanoglous, George, y Frank Kreith. *Handbook of Solid Waste Management*. New York: McGraw-Hill, 2002.



Thermoselect. «An advanced field proven high temperature recycling process.» London: SCENARIO SOLUTIONS for the City Solutions Stakeholder Day, 2003.

—. «Plant & Proces Description.» Enero de 2005. http://iwtonline.com/docs/Thermoselect_process_description.pdf (último acceso: 23 de Febrero de 2009).

TIRU. TIRU. 2003. http://www.newlincs.com/tiru_group_ref_plants.pdf (último acceso: 12 de Mayo de 2009).

Triola, Mario F. *Estadística*. Naucalpan, Estado de México: Pearson Educación de México S. A. de C. V., 2004.

Umland, Jean B., y Bellama Jon M. *Química General*. México: International Thomson Editores S. A. de C. V., 2000.

Volker, Schulz. «Activated Lignite HOK(R) Helps Clean the Air in Paris.» Newswire Europe Limited. 2009. <http://www.prnewswire.co.uk/cgi/news/release?id=158818> (último acceso: 12 de 05 de 2009).

**7. Anexos.****Anexo 1.** Transferencia de residuos en el D. F.

(Gobierno del Distrito Federal 2008)

Delegación	Flujo de residuos (ton/día)	Residuos transferidos en la estación (%)	Fracción
ÁLVARO OBREGÓN	1,169.9	10.7	0.1071
AZCAPOTZALCO	1,238.1	11.3	0.1133
BENITO JUAREZ	421.6	3.9	0.0386
COYOACÁN	1,411.3	12.9	0.1292
CUAUHTÉMOC	909.7	8.3	0.0833
GUSTAVO A. MADERO	816.0	7.5	0.0747
IZTAPALAPA I	1,293.4	11.8	0.1184
IZTAPALAPA II	1,305.7	11.9	0.1195
MIGUEL HIDALGO	599.0	5.5	0.0548
MILPA ALTA	76.5	0.7	0.0070
TLALPAN	493.1	4.5	0.0451
VENUSTIANO CARRANZA	717.2	6.6	0.0656
XOCHIMILCO	475.2	4.3	0.0435
TOTAL	10,927	100	1



Anexo 2. Procedimiento para la toma de muestra de RSU.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de obtener una muestra de RSU en cada punto de muestreo, la cantidad de veces que sea necesario para que pueda considerarse representativa.

ALCANCE

El análisis está dirigido a cualquier tipo de residuos sólidos urbanos.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos.

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

No se necesita de equipo adicional.

MATERIALES

Guantes de carnaza	Botas de seguridad
Lentes de seguridad	Toneles 200 L
Overoles	Palas
Mascarillas	Bieldos

PROCEDIMIENTO

- a) Es elegido un camión mediante un procedimiento aleatorio.
- b) Se procede a encuestar al operador para obtener datos de la procedencia de los RSU.
- c) Se espera la descarga de los RSU contenidos en el camión.
- d) Se colecta la mayor cantidad posible en el tonel.
- e) Finalmente el tonel, conteniendo la muestra, es llevado al área de trabajo.



Ilustración 1. Selección de muestra.

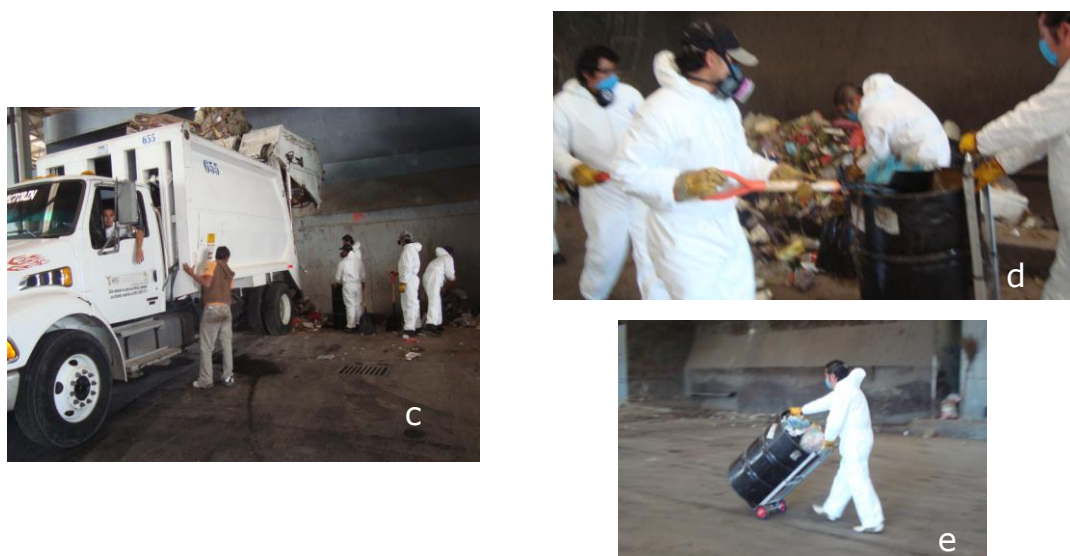


Ilustración 2. Toma de muestra.

INTERFERENCIAS

La operación en cada sitio de muestreo (Estación de Transferencia) es fundamental, de manera que para algunos lugares la muestra puede ser vaciada en el patio de maniobras para después ser colectada en el tonel, ser descargada directamente al tonel o en el peor de los casos jalarla de dentro de la tolva al tonel mediante bieldos.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

ASTM-D-5231-92 "Método de prueba estándar para la determinación de la composición de residuos sólidos municipales sin procesar".



Anexo 3. Método de Cuarteo.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de homogenizar una muestra total de RSU.

ALCANCE

El análisis está dirigido a cualquier muestra de residuos sólidos urbanos.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

No se necesita de equipo adicional

MATERIALES

Palas	Botas
Bieldos	Lentes de seguridad
Mascarillas	Guantes de carnaza
Overoles	

RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA.

La muestra a la que se realiza una homogenización es aquella recolectada mediante el "procedimiento de toma de muestra de RSU".

PROCEDIMIENTO

- a) Se limpia y delimita una superficie plana, horizontal de 4 x 4 m.
- b) Se vierte el contenido de las bolsas, o toneles resultado del muestreo en el área de trabajo
- c) Cuando hayan sido colectadas y vertidas todas las muestras en el área de trabajo, mediante una pala y/o bieldo se revuelven todos los residuos.
- d) Una vez mezclada toda la muestra es dividida en 4 partes iguales.



a



Ilustración 3. Preparación de área de trabajo.



b



c



d

Ilustración 4. Método de cuarteo.

INTERFERENCIAS

Puede que materiales muy grandes sean encontrados en la muestra, en este caso deben ser reducidos en volumen y si no es posible deben ser retirados de la muestra total.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NMX-AA-015-1985 Método de Cuarteo.



Anexo 4. Determinación de Peso Volumétrico en RSU.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar el peso volumétrico [kg/m^3] de una muestra de residuos sólidos urbanos.

ALCANCE

El análisis está dirigido a muestras de residuos sólidos urbanos, cuya composición sea *orgánica* o *mixta*.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos.

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Báscula con capacidad sugerida de 150 kg.

MATERIALES

Tonel	Mascarillas
Palas	Lentes de seguridad
Overoles	Guantes de carnaza
Botas	

RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA.

Proviene directamente del muestreo y su posterior homogenización.

PROCEDIMIENTO

- Una vez realizado el procedimiento de homogenización, debe despejarse la parte central del área de cuarteo de manera que quede libre de residuos.
- Colocar un tonel de volumen conocido (V) en el área despejada, registrando previamente su peso (P_1).



- c) Tomar una cantidad de residuos del primer cuadrante, correspondiente al volumen que pueda manejar una pala y colocarlos en el interior del tonel.
- d) Proceder de igual manera para los otros 3 cuadrantes de manera consecutiva, y repetir hasta llenar el tonel, al borde.
- e) Una vez lleno el tonel, se procede a realizar una maniobra de asentamiento de los residuos: elevando a una altura de 10 cm para después dejarlo caer. Repetir 3 veces.
- f) Deben colocarse residuos nuevamente hasta completar el volumen del tonel y repetir el procedimiento de asentamiento.
- g) Se procede a retirar los residuos que sobresalen del borde del tonel, cuidando que la superficie del tonel tenga un nivel raso, mediante una barra metálica o de madera (puede ser el mango de una pala o bieldo).
- h) Se determina y registra el peso del tonel con la muestra (P_2).
- i) Finalmente se realizan los cálculos necesarios.



Ilustración 5. Llenado de tonel.

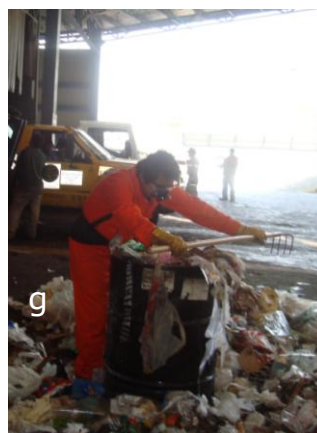


Ilustración 6. Asentamiento y registro de peso.

CÁLCULOS

$$P_V = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

Donde:

P_V = Peso volumétrico del residuo (kg/m^3)

P_2 = Peso del tonel + peso de la muestra de RSU (kg)

P_1 = Peso del tonel (kg)

V = Volumen del recipiente (m^3)

INTERFERENCIAS

Debe cuidarse no ejercer fuerza sobre los residuos al ingresarlos en el tonel, ya que podría afectar la medición.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NMX-AA-019-1985 Peso Volumétrico "IN SITU".



Anexo 5. Determinación de Análisis Elemental.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar la cantidad de C, H, N, S y O en muestras de RSU.

ALCANCE

El análisis está dirigido a muestras de residuos sólidos urbanos, cuya composición sea *orgánica* o *mixta*.

REACTIVOS

Cobre

Anhídrido de tungsteno

Gas portador: helio de ultra alta pureza 99.999%

Gases auxiliares: Oxígeno de alta pureza 99.99%

PATRONES

Metionina

Ácido benzoico

Urea

Acetanilidina

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Analizador elemental

Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g

MATERIALES

Cápsulas de estaño

Tubo de cuarzo de diámetro de 10 mm y longitud de 250 mm

Fibra de cuarzo

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA.

La muestra proviene del muestreo, reducción de volumen mediante trituración, su posterior secado y una segunda reducción de volumen mediante pulverización. Debe ser analizada inmediatamente después de



su preparación, en caso contrario debe conservarse en refrigeración a 4°C. La muestra debe secarse a una temperatura de 120°C y el tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

PROCEDIMIENTO

- a) Colocar entre 1-3 mg de muestra en una capsula de estaño, cerrándola con pinzas cuidando no romperla.
- b) Registrar el peso de la muestra en la computadora
- c) Colocar la capsula en el auto-muestreador

Nota: Antes de correr las muestras se analizan 5 muestras del mismo estándar con pesos similares para que elaborar la curva de calibración.

CÁLCULOS

El contenido en N, H, C y S se calculan mediante la curva de calibración y la siguiente ecuación:

$$Y = mK + b$$

El contenido de oxígeno se toma como la diferencia del contenido de C, H, N, y S, respecto al 100%:

$$\%O = 100 - (\%C + \%H + \%N + \%S)$$

INTERFERENCIAS

Debido a que se determinan los elementos contenidos en base a productos de la combustión tales como el H₂O, debe eliminarse el agua de las muestras y es muy importante el paso de secado de las mismas.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, United States of America, Washington, DC 20005, 19th Edition 1995.



Anexo 6. Determinación de subproductos.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar la composición en masa de subproductos, contenida en muestras de residuos sólidos urbanos.

ALCANCE

El análisis está dirigido principalmente a una muestra de residuos sólidos urbanos proveniente de la fracción mezcla.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos.

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Báscula de piso con capacidad sugerida de 100 kg

Balanza granataria de 20 kg y sensibilidad de 1 g

MATERIALES

12-15 charolas de plástico
(contenedores)

Escobas

Recogedores

Guantes de plástico o de
carnaza

Brochas de 0.025 m de ancho
como mínimo

Mascarilla contra olores

Mesa o tabla de triplay de 3 x

Lentes de seguridad

1.5 m

RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA.

Proviene directamente del muestreo y su posterior homogenización de la que se tomó un mínimo de 50 kg de la misma forma en que fue tomada



la muestra para la determinación del peso volumétrico hasta obtener los 50 kg.

PROCEDIMIENTO

- a) Se registró el peso de las charolas de plástico para después ser colocados alrededor de la mesa.
- b) La muestra con un peso de aprox. 50 kg (G) fue colocada en la mesa o tabla de triplay.
- c) Los subproductos son seleccionados depositándolos en las charolas hasta agotarlos.
- d) Los subproductos ya clasificados son pesados en la balanza granataria registrando su peso (G_1).



Ilustración 7. Segregación.



Los materiales se seleccionan en base a lista de subproductos clasificados que a continuación se presenta y fue modificada de la NMX referente a la cuantificación de subproductos:

Tabla A. 1 Subproductos presentes en los RSU de D.F.

#	Subproducto	#	Subproducto	#	Subproducto
1	Cartón	13	Papel sanitario	25	Residuos de orgánicos
2	Lata de aluminio	14	Otros Papeles	26	Residuos especiales (medicinas caducas, pilas, llantas, punzo y cortantes)
3	Loza y cerámica	15	Periódico	27	Residuos peligrosos
4	Madera	16	Plástico N-1 Polietilentereftalato PET	28	Tetra pack
5	Material de construcción	17	Plástico N-2 Polietileno de alta densidad PEAD	29	Trapo (natural y sintético)
6	Material eléctrico	18	Plástico N-3 Policloruro de Vinilo PVC	30	Unicel Poliestireno Expandido
7	Material ferroso	19	Plástico N-4 Polietileno de baja densidad PEBD	31	Vidrio de color
8	Pañal des./ toallas sanitarias	20	Plástico N-5 Polipropileno PP	32	Vidrio transparente
9	Papel aluminio	21	Plástico N-6 Poliestireno PS	33	Zapatos
10	Papel de impresión	22	Plástico N-7 otros plásticos	34	Biológico infecciosos
11	Papel de revista	23	Bolsa de plástico	35	Otros
12	Papel encerado	24	Residuo finos		

CÁLCULOS

$$\%x = \frac{G_x - Gch}{G} \cdot 100$$

Donde:

%x = Porcentaje másico del subproducto considerado

G = Peso total de la muestra (kg)



G_{ch} = Peso de la charola (kg)

G_x = Peso del subproducto considerado (kg)

INTERFERENCIAS

Es posible obtener diferencias entre la suma de los pesos de los subproductos y la muestra original, atribuible a la pérdida de materiales finos o humedad durante el procedimiento.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NMX-AA-022-1984 Selección y cuantificación de subproductos.



Anexo 7. Determinación de Porcentaje Humedad en RSU

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar el porcentaje de humedad en masa, contenida en muestras de residuos sólidos urbanos

ALCANCE

El análisis está dirigido a muestras de residuos sólidos urbanos, cuya composición sea *orgánica* o *mixta*.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g

Estufa con temperatura de 423K (150°C), con sensibilidad de 1.5K (1.5°C), capaz de mantener una temperatura constante de +/- 5 °C

Desecador para muestras

MATERIALES

Espátula metálica

Charolas de aluminio con capacidad de 250 cm³, éstas pueden ser elaboradas manualmente con papel aluminio formando una estructura de caja.

Guantes de asbesto



RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA.

El material proveniente del muestreo realizado debe recibirse en el laboratorio correctamente etiquetada, para posteriormente ser triturado hasta un tamaño máximo de 5 cm. Posteriormente se homogeniza y se toma una muestra representativa de aproximadamente 1 kg, del cual se toman las muestras para la presente determinación.

PROCEDIMIENTO

- a) Las charolas de aluminio se llevan a peso constante en la estufa a 120°C, durante 1 hora.
- b) Se dejan enfriar las charolas en el desecador.
- c) Una vez a temperatura ambiente, se registra su peso (G).
- d) Se colocan entre 15 y 30 g de muestra, de acuerdo a su densidad (a menor densidad mayor cantidad de muestra). Y se registra el peso de la muestra + la charola (G_1).
- e) La charola que contiene la muestra húmeda se coloca en la estufa a 120 °C durante 1 a 3 h dependiendo la muestra. (generalmente las muestras de fracción orgánica contienen mayor cantidad de humedad necesitando mayor tiempo para eliminar la misma).
- f) Una vez transcurrido el tiempo considerado se saca la muestra de la estufa y se deja enfriar en el desecador.
- g) Una vez a temperatura ambiente se registra el peso.
- h) Se vuelve a colocar la muestra en la estufa y se repite el procedimiento de enfriamiento y pesar hasta obtener una medición de peso constante (G_2).
- i) Se realiza el cálculo para la determinación del %H



Ilustración 8. Preparación de muestra



Ilustración 9. Secado y peso constante de muestra.



CÁLCULOS

$$\%H = \frac{G_1 - G_2}{G_1 - G} \cdot 100$$

Donde:

G = Peso de charola (g)

G1= Peso de muestra húmeda + peso de charola (g)

G2 = Peso de muestra seca + peso de charola (g)

INTERFERENCIAS

Es posible obtener interferencias en la determinación del %H como resultado de la exposición de la muestra a la humedad atmosférica. Para evitar esto, trasladar la muestra desde la salida de la estufa hasta el desecador en forma rápida con una distancia de traslado lo más corta posible.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NMX-AA-016-1984 Determinación de humedad en residuos sólidos municipales



Anexo 8. Determinación de contenido de cenizas en RSU

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar el contenido de cenizas en porcentaje masa, en muestras de residuos sólidos urbanos

ALCANCE

El análisis está dirigido a muestras de residuos sólidos urbanos, cuya composición sea *orgánica* o *mixta*.

REACTIVOS Y PATRONES

No se necesitan reactivos

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Balanza granataria con sensibilidad de 0.1 g

Mufla con temperatura de 1073K (800°C), capaz de mantener una temperatura constante de +/- 10 °C

Desecador para muestras

Campana de extracción

Pulverizadora

MATERIALES

Espátula metálica

Crisoles de porcelana con capacidad para 5 g de muestra.

Guantes de asbesto

Tijeras.

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA.

El material proveniente del muestreo debe recibirse en el laboratorio correctamente etiquetado, para posteriormente ser reducida hasta un tamaño máximo de 5 cm, de forma manual mediante el uso de tijeras, para después ser homogenizada y se toma una muestra representativa de aproximadamente 1 kg, del cual se toman muestras para la presente



determinación. Para detalles sobre almacenamiento y preservación, consultar la NMX-AA-052.

PROCEDIMIENTO

- a) Realizar secado de la muestra y determinación de porcentaje de humedad (Ver TÉCNICA ANALÍTICA- DETERMINACIÓN DE PORCIENTO DE HUMEDAD EN RSU)
- b) Pulverizar la muestra seca y verificar peso constante una vez pulverizada.
- c) Los crisoles se llevan a peso constante en la mufla a 200°C, durante 1 hora.
- d) Se deja enfriar los crisoles en el desecador.
- e) Una vez a temperatura ambiente, se llevan a peso constante y una vez lo anterior, se registra su peso (G_1).
- f) Se colocan entre 1.5 y 4 g de muestra seca en los crisoles. Registrando el peso (G_2).
- g) Dentro de una campana de extracción, las muestras son calcinadas en una primera etapa en una parrilla a 300°C (573 K), en esta etapa se producirá humo, retirar del calentamiento cuando la generación de humo se detenga.
- h) Posteriormente, se colocan los crisoles en la mufla precalentada a 300°C (573 K), y se calcinan las muestras en una segunda etapa a 800°C (1073 K) por 1 hora.
- i) Se retiran los crisoles de la mufla una vez que la temperatura de la misma disminuya a 300°C (573 K). Se dejan enfriar en el desecador.



- j) Una vez que los crisoles se encuentren a temperatura ambiente se registra su peso (G_3).
- k) Se realiza el cálculo para la determinación del % cenizas.



Ilustración 10. Preparación de muestra (cenizas).



Ilustración 11. Calcinación.

CÁLCULOS

$$\%cenizas_{BS} = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - G_1} \cdot 100$$



$$\%cenizas_{BH} = \%cenizas_{BS} * X_H$$

Donde:

$\% cenizas_{BS}$ = por ciento en masa de cenizas, en base seca.

$\% cenizas_{BH}$ = por ciento en masa de cenizas, en base húmeda.

X_H = Contenido de humedad ($g_{H_2O}/g_{muestra\ húmeda}$)

G1 = Peso de crisol vacío (g)

G2 = Peso de crisol + muestra seca (g)

G3 = Peso de crisol + muestra calcinada (g)

INTERFERENCIAS

Es posible obtener interferencias en la determinación del $\%cenizas$ como resultado de la exposición de la muestra a la humedad atmosférica. Para evitar esto, trasladar la muestra desde la salida de la mufla hasta el desecador en forma rápida con una distancia de traslado lo más corta posible.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NMX-AA-018-1984 Determinación de cenizas en residuos sólidos municipales



Anexo 9. Determinación de Poder calorífico superior.

PROPÓSITO

Este procedimiento se realiza con el objetivo de determinar el la cantidad de calor liberada al pasar por un proceso de combustión una muestra de residuos sólidos urbanos.

ALCANCE

El análisis está dirigido a muestras de residuos sólidos urbanos, cuya composición sea *orgánica* o *mixta*.

REACTIVOS

Gases auxiliares: Oxígeno de alta pureza 99.99%

PATRONES

No se necesitan reactivos adicionales.

EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Calorímetro diferencial de barrido

MATERIALES

Crisoles de aluminio de 40 microlitros

Pinzas de aluminio

Espátula de aluminio

Prensa para crisoles

Charola transportadora

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA MUESTRA.

La muestra proviene del muestreo, seguida de reducción de volumen mediante trituración, su posterior secado y una segunda reducción de volumen mediante pulverización. Debe ser analizada inmediatamente



después de su preparación, en caso contrario debe conservarse en refrigeración a 4°C. La muestra debe secarse a una temperatura de 120°C y el tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

PROCEDIMIENTO

- a) Colocar entre 1-3 mg de muestra en un crisol de aluminio, cerrándolo mediante la prensa colocando la tapa previamente.
- b) Registrar el peso de la muestra en la computadora.
- c) Colocar la capsula en la charola, cuidando de fijarla correctamente en la guía.
- d) Lanzar el experimento a las condiciones requeridas. (tasa de calentamiento de 3°C/min y flujo de oxígeno de 25 ml/min)

Nota: Antes de realizar determinaciones debe realizarse una corrida de limpieza con una muestra de Indio con gas nitrógeno.

CÁLCULOS

Mediante el software se realiza la integración del área bajo la curva que mostrará el Pc en J/g.

INTERFERENCIAS

Para cuidar la representatividad de la muestra, debe llevarse a cabo cuidadosamente la homogenización de la muestra. Debe tratar de eliminarse toda la humedad de la muestra previa a la determinación ya que un gran contenido de humedad podría desplazar la curva de medición.