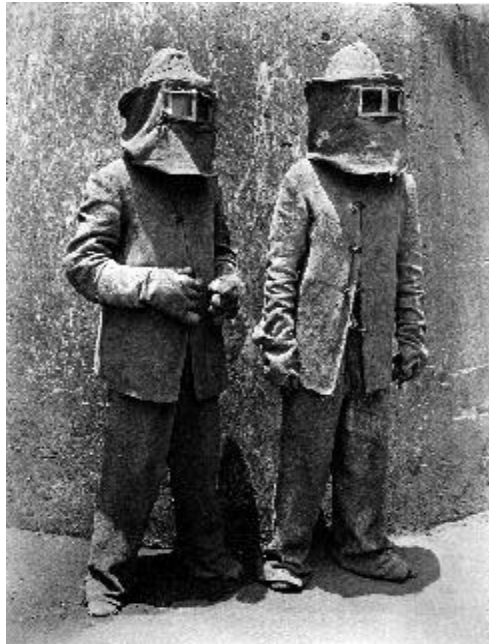


Evaluación de la incineración de residuos peligrosos

ANABELL ROSAS DOMÍNGUEZ, ANGÉLICA PEÑA LUNA,
GRACIELA RAMOS RODRÍGUEZ, CHIAKI IZUMIKAWA,
GUILLERMO AGUILAR, JUAN VELASCO TREJO,
SERGIO FLORES MARTÍNEZ, ADRIÁN DÍAZ RAMOS,
ANA MAGDALENO GUTIÉRREZ, LUIS GARCÍA ROMERO
Y PAOLA SALGADO FIGUEROA



INTRODUCCIÓN

El proceso de incineración ha existido en México desde finales de la década de 1970, antes del establecimiento de la legislación que rige actualmente a los residuos peligrosos. Los primeros incineradores se instalaron en hospitales, universidades e institutos de

investigación, con el fin de cremar residuos patológicos o cadáveres; a estos se sumaron los incineradores particulares de dos empresas de la industria química, para tratar los residuos generados en sus propios procesos (DGMRRAR 1998).

A partir de 1990 la incineración se ofreció como un servicio comercial; sin embargo, a partir de 1996, tras la publicación de la NOM-087-ECOL-1995, donde se establecen los requisitos para el manejo de los residuos biológico-infecciosos, la infraestructura instalada creció rápidamente, en especial para la incineración de estos residuos, tendencia que se observa claramente en la gráfica 1. Cabe mencionar que a partir de 1998, la solicitud de autorizaciones para la incineración de residuos peligrosos y biológico-infecciosos disminuyó drásticamente debido a la rectificación en el valor de generación de estos residuos, que inicialmente era de 4.1 kg/cama/día y finalmente se aclaró que era de 1.5 kg/cama/día (DGMIC 2001).

Actualmente existen en México 35 empresas autorizadas para la incineración de residuos peligrosos. Algunas de ellas cuentan con más de un equipo, por lo que hay un total de 43 incineradores operando, de los cuales el 85% se utiliza para residuos biológico-infecciosos y el 15% restante incinera residuos industriales (DGMIC 2001). A la fecha, la incineración

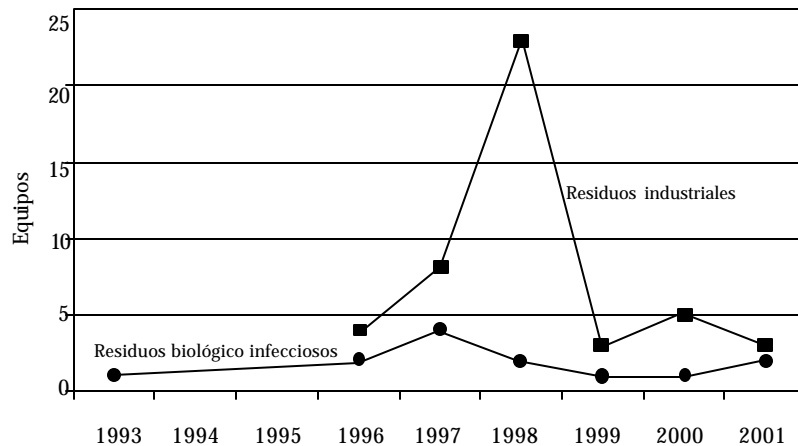
no se aplica como método de tratamiento para residuos sólidos municipales a escala industrial.

Asimismo, desde 1995 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), coordina el grupo de trabajo que elaboró el PROY-NOM-098-ECOL-2000 sobre incineración de residuos, condiciones de operación y límites de emisión de contaminantes, publicado el 8 de septiembre de 2000 en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) que actualmente se encuentra en revisión. Esta norma se elaboró considerando tanto la tendencia de la legislación sobre incineración a nivel mundial, como la situación actual de la incineración en México, y se le incorporaron condiciones de operación y límites de emisión tan estrictos como las vigentes en cualquier país tecnológicamente avanzado.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INCINERACIÓN

El método de evaluación de desempeño de los sistemas de incineración se diseñó para valorar los diferentes

GRÁFICA 1. AUTORIZACIONES OTORGADAS PARA LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS



Fuente: Pérez Torres 2001.

parámetros de operación de los incineradores, de acuerdo con rangos de operación satisfactorios, basados en su mayoría en los lineamientos establecidos por el PROY-NOM-098-ECOL-2000 y en las normas aplicables en países donde la incineración es práctica común. Se incluyen también otros parámetros que no están directamente relacionados con el proceso de incineración, pero que deben atenderse para mejorar el desempeño general de las plantas. Así, se asignaron valores de acuerdo con una escala donde se distinguen condiciones y características de una operación ineficiente, satisfactoria o excelente, valoradas con 0, 1 y 2, respectivamente, como se muestra en el cuadro 1.

Los criterios empleados para establecer dichos valores están basados tanto en las condiciones establecidas en el PROY-NOM-098-ECOL-2000, como en la legislación y literatura internacionales sobre el proceso de incineración, los cuales se exponen en los siguientes apartados.

CRITERIOS DE COMBUSTIÓN

Temperatura en la cámara de combustión primaria.
Por tratarse de un proceso térmico, la temperatura es uno de los parámetros más importantes para garantizar la destrucción eficiente de los residuos. Sin

CUADRO 1. CRITERIOS APLICADOS PARA VALORAR EL DESEMPEÑO DE LAS PLANTAS DE INCINERACIÓN

PARÁMETRO	RANGO	VALOR ^b	OBSERVACIONES
<i>Criterios de combustión^a</i>			
Temperatura en CC1	< 800 °C	0	Combustión incompleta
	800 a 1000 °C	2	Operación adecuada
	> 1000 °C	1	Daño al material refractario
Temperatura en CC2	< 850 °C	0	Combustión incompleta
	850 a 1200 °C	2	Operación adecuada
	> 1200 °C	1	Daño al material refractario
Tiempo de retención en CC2	< 2 seg	0	Insuficiente para destrucción de compuestos orgánicos
	≥ 2 seg	2	Suficiente para destrucción de compuestos orgánicos
Pérdida de materia volátil de las cenizas	> 10%	0	Representa combustión incompleta
	5 a 10%	1	Representa combustión satisfactoria
	< 5%	2	Garantiza la mejor combustión
<i>Criterios para el tratamiento de gases</i>			
Control de partículas y gases ácidos	Nulo	0	Se emiten contaminantes a la atmósfera

(continúa)

CUADRO 1. CRITERIOS APLICADOS PARA VALORAR EL DESEMPEÑO DE LAS PLANTAS DE INCINERACIÓN

PARÁMETRO	RANGO	VALOR ^b	OBSERVACIONES
	Básico	1	Hay remoción de partículas
	Avanzado	2	Hay remoción de partículas y gases ácidos
Temperatura de salida de los gases	> 250 °C	0	Altas probabilidades de generación de dxn ^c
	250 a 200 °C	1	Se reduce la generación de dxn
	< 200 °C	2	La generación de dxn es casi nula
<i>Otros criterios importantes</i>			
Almacenamiento de residuos	No adecuado	0	Genera condiciones de inseguridad en la planta
	Adecuado	2	Existe buen manejo de los residuos
Manejo de cenizas	Sin separación	0	Provoca dilución y disposición inadecuada
	Con separación	0	Evita la dilución
	C/separación y estabilización	2	Provee el manejo adecuado
Tratamiento de agua	Nulo	0	Provoca descarga de contaminantes
	Físico-químico	2	Provee tratamiento adecuado

^a CC1 = cámara de combustión primaria; CC2 = cámara de combustión secundaria;

^b 0 = ineficiente; 1 = satisfactorio; 2 = excelente; ^c dxn = dioxinas y furanos

embargo, para la cámara de combustión primaria existen escasas referencias, ya que este parámetro depende de diversos factores, como el tipo de residuo o de incinerador. En la literatura se reportan rangos de temperatura desde 400 hasta 1,600 °C, no obstante, se sugiere que en el caso de los residuos hospitalarios la temperatura mínima en esta cámara de combustión sea mayor a 760 °C (Midwest Research Institute 1989, USEPA 1990, California Air Resources Board 1992). Asimismo, se recomienda que la temperatura no exceda de 1,000 °C, debido que a partir de este punto las cenizas pueden fundirse y provocar la incrustación de escorias en el material refractario, ocasionando deterioro en el equipo (Brunner 1993, USEPA 1990).

Temperatura en la cámara de combustión secundaria. Dependiendo de factores como el tipo de incinerador o de residuo, la cámara de combustión se opera entre 900 y 1,600 °C. Por su parte el PROY-NOM-098-ECOL-2000 señala que aún en las condiciones más desfavorables, los incineradores deben alcanzar una temperatura mínima de 850 °C y en caso de incinerar compuestos clorados, la temperatura debe elevarse hasta 1,000 ± 100 °C. Estas condiciones son similares a las establecidas en la Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del consejo relativo a la incineración de residuos. La USEPA (1990), sugiere que en esta cámara la temperatura no exceda de 1,200 °C para evitar daños en el material refractario del incinerador.



Tiempo de retención de los gases en la cámara de combustión secundaria. Existe una relación estrecha entre el tiempo de retención de los gases y la temperatura de combustión en la cámara de combustión secundaria, observándose que a mayor tiempo de retención de los gases, disminuye la temperatura necesaria para la destrucción de los residuos (Brunner 1993). En la práctica, se recomienda que el tiempo de retención de los gases en la segunda cámara de combustión sea de uno a tres segundos, en tanto otras regulaciones coinciden en establecer un mínimo de dos segundos (Directiva 2000/76/CE: 4, PROY-NOM-098-ECOL-2000).

Pérdida de materia volátil de las cenizas. En cenizas de fondo, la pérdida de materia volátil es una aproximación de la calidad de combustión de los residuos, debido a que estas cenizas generalmente se exponen a temperaturas iguales o mayores a los 550 °C que se especifican en la prueba estandarizada para su determinación. No obstante, en el caso de las cenizas volantes, éste no es un parámetro representativo debido a que los equipos de control de emisiones ope-

ran a temperaturas considerablemente más bajas, además de que en ocasiones se adicionan reactivos que a esa temperatura pueden representar una pérdida de peso adicional. La pérdida de materia volátil permitida en el PROY-NOM-098-ECOL-2000 es de 10%, mientras que en la regulación europea y japonesa debe ser menor a 5%.

CRITERIOS PARA EL TRATAMIENTO DE GASES

Control de partículas y gases ácidos. Las partículas se generan por la presencia de materiales no combustibles que alimentan al incinerador por productos de la combustión incompleta de los residuos o por la condensación de compuestos volatilizados. Su concentración en los gases emitidos a la atmósfera depende de la turbulencia así como de la velocidad de los gases en la cámara secundaria. Los equipos que se emplean con mayor frecuencia en la remoción de partículas son los lavadores de gases, ciclones, precipitadores electrostáticos y filtros de bolsas. Por otra parte, los gases ácidos

que comúnmente se generan son: HCl, SO_x y NO_x. En el caso de los dos primeros, no se requieren condiciones especiales de operación para inducir o evitar su formación, pero se pueden remover con relativa facilidad al neutralizar el flujo de los gases con reactivos alcalinos (NaOH y CaOH₂). Sin embargo, la generación de NO_x depende de la temperatura de combustión, encontrándose que a partir de 1,000 °C su concentración en los gases de combustión se incrementa sustancialmente (Brunner 1993). Entre las medidas empleadas para la remoción de NO_x se encuentran la recirculación de los gases de la cámara de combustión secundaria y/o la adición de amoníaco en la zona de combustión (IAWG 1997). Por lo tanto, el tratamiento completo de los gases de combustión implica la combinación de varios procesos específicos.

Temperatura de salida de los gases. Se han establecido límites para la temperatura de salida de los gases, principalmente para minimizar la formación de dioxinas por medio de las reacciones *de Novo*. De acuerdo con esta teoría, la formación de dioxinas y furanos es mínima cuando la temperatura es menor a 250 °C (Lanier 1998), por lo que el PROY-NOM-098-ECOL-2000 establece ese valor como máximo para los gases emitidos a la atmósfera. En Japón se establece que la temperatura de los gases debe reducirse hasta 200 °C para disminuir aún más la posibilidad de generación de dioxinas (Matsumura 1998).

OTROS CRITERIOS IMPORTANTES

Manejo de cenizas. Las cenizas de fondo o escorias generadas en la cámara de combustión primaria se componen principalmente de materiales inertes, mientras que las cenizas volantes que se atrapan en los equipos de control de emisiones presentan mayor concentración de materia orgánica y de metales en forma de compuestos relativamente solubles, algunos de los cuales, como el Cd, Ni o Pb, están regulados como constituyentes peligrosos en la NOM-052-

ECOL-1993. En Japón y en los países europeos se recomienda que las dos corrientes de cenizas se manejen por separado y que al menos las cenizas volantes se estabilicen antes de su disposición (IAWG 1997). En México y los Estados Unidos de América las cenizas deben disponerse como residuos peligrosos cuando al realizar una prueba de extracción se encuentren compuestos en concentraciones mayores a las permitidas (IAWG 1997, PROY-NOM-098-ECOL-2000).

Tratamiento de aguas residuales. Las aguas residuales de las plantas de incineración provienen de los equipos de lavado de gases o de la limpieza de contenedores, vehículos, derrames, entre otros, y en general se depuran por medio de trenes de tratamiento físico-químico. No obstante, sólo la Directiva 2000/76/CE ha incluido límites para sólidos suspendidos y metales pesados además de dioxinas y furanos en las aguas provenientes de los incineradores. Igualmente, el PROY-NOM-098-ECOL-2000 establece que las aguas residuales deberán ajustarse a los criterios particulares de descarga o a los ordenamientos jurídicos aplicables que en este caso serían las normas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-002-ECOL-1996.

Almacenamiento de residuos. Las condiciones de almacenamiento de residuos peligrosos que aplican para México están establecidas en el Reglamento en materia de residuos peligrosos de la LGEEPA. Sin embargo, adicionalmente deben considerarse para los residuos patológicos las condiciones particulares establecidas en la NOM-087-ECOL-1995, donde se indica que el almacenamiento de estos residuos deberá ser en cámaras de temperatura controlada no mayor a 4 °C. Estas condiciones se respetan en el PROY-NOM-098-ECOL-2000.

ESTUDIO DE CASO EN PLANTAS DE INCINERACIÓN

PARÁMETROS OBSERVADOS

Con la finalidad de aplicar la metodología propuesta para la evaluación de la eficiencia de los procesos de

incineración que se llevan a cabo en México, se visitaron diez plantas de incineración de residuos peligrosos, biológico-infecciosos y medicamentos caducos.

Durante las visitas se observaron equipos de incineración de lecho fijo, de semi-suspensión y hornos rotatorios, con cámaras de combustión primaria y secundaria. Las capacidades de operación de estos equipos van desde 109 hasta 588 kg/hora y la operación se realiza en uno o dos turnos, dependiendo de la demanda del servicio.

Todos los incineradores de lecho fijo que se visitaron funcionan bajo el régimen de alimentación por lotes o semi-continuo; entre los incineradores de alimentación continua se encontraron dos rotatorios y dos con sistema de semi-suspensión. Estos últimos tienen como característica que los residuos pasan por una operación de reducción de tamaño antes de alimentar de forma neumática al incinerador, con lo que se consigue la combustión completa de los residuos en un tiempo más corto que con otros tipos de incineradores.

Las temperaturas de operación en la cámara de combustión primaria que se registraron en los incineradores de residuos industriales estuvieron entre 650 y 1,100 °C; en el caso de los incineradores de residuos biológico-infecciosos y medicamentos caducos se encontró un rango considerablemente amplio, desde 500 hasta 1,100 °C.

Las temperaturas encontradas en la cámara de combustión secundaria oscilaron entre 900 y 1,250 °C, aunque en la mayoría de las plantas se hallaron temperaturas entre 1,000 y 1,100 °C, un rango apreciablemente más compacto, probablemente debido a que éste es uno de los parámetros establecidos en el PROY-NOM-098-ECOL-2000.

Todos los datos obtenidos en relación con el tiempo de retención de los gases en la cámara de combustión secundaria fueron mayores o iguales a dos segundos; sin embargo, debe aclararse que en todos los casos el valor fue proporcionado por los operadores de cada planta, sin que se tuviera la oportunidad de

comprobarse la veracidad de la información. En tres de los casos, el operador manifestó desconocer el dato correspondiente.

Se observó una variedad de tecnologías en los sistemas de control de emisiones, desde sistemas unitarios donde se realiza el lavado y enfriamiento de los gases en el mismo equipo, hasta trenes completos que incluyen la remoción de partículas empleando lavadores, ciclones o filtros de bolsas y la neutralización de gases ácidos por medio de neutralizadores de HCl y SO_x, que emplean reactivos como NaOH y CaOH₂, o la recirculación de los gases para la remoción de NO_x. En el 70% de las plantas evaluadas se encontró que empleaban más de uno de los equipos mencionados anteriormente.

Las temperaturas de salida de los gases fluctuaron entre 75 °C y 330 °C, pero se observó que ocho de las diez plantas visitadas cumplen con el estándar de 250 °C establecido en el PROY-NOM-098-ECOL-2000, y cinco de ellas presentaron temperaturas de salida de los gases menores a 200 °C.

Por otra parte, se observó que las plantas en general almacenan las cenizas volantes y de fondo de forma conjunta en contenedores temporales dentro de sus instalaciones y posteriormente se vierten sin tratamiento en sitios de disposición de residuos sólidos municipales. La única planta de incineración que manifestó manejar por separado las diversas corrientes de cenizas fue la número 9, que reincinera las cenizas volantes generadas en el proceso; sin embargo, no se considera un tratamiento completamente eficiente, ya que ocasiona que los metales fluyan constantemente en un circuito cerrado dentro del sistema, sin posibilidad de salida, incrementando cada vez su concentración en las cenizas volantes.

En cuanto al tratamiento del agua, el 50% de las plantas aplica un tratamiento físico-químico al agua residual generada en el proceso, consistente básicamente en un tratamiento primario de floculación y sedimentación de las partículas arrastradas. Otros sis-

temas incluyeron la reutilización del agua de lavado de contenedores para el proceso de enfriamiento de los gases o la introducción a la cámara de combustión primaria después de absorberla en una matriz sólida, como el aserrín. Solamente dos plantas manifestaron no dar tratamiento al agua residual antes de descargar al drenaje municipal.

Todas las plantas presentan buenas condiciones de almacenamiento, a excepción de la planta No. 4, que no cuenta con cámara fría para el almacenamiento de los residuos patológicos.

El resumen de las condiciones encontradas en las plantas de incineración se muestran en el cuadro 2, numeradas en el orden en que se visitaron.

CUADRO 2. RESUMEN DE PRÁCTICAS DE OPERACIÓN OBSERVADAS EN PLANTAS DE INCINERACIÓN

PLANTA NÚMERO	1	2	3	4	5
PARÁMETRO					
Residuos tratados	RPBI Medicamentos caducos	RPBI Patológicos	RPBI	RPBI Patológicos	RPBI Patológicos
Temp. CC1	650	500	1,100	1,100	800
Temp. CC2	1,100	900	900	1,000	1,100
Tiempo CC2	—	2 seg.	—	2.4 seg.	—
Tratamiento de gases	Enfriador NTR Ciclón Filtros bolsa Chimenea	Lavador/ Enfriador Filtros bolsa Chimenea	Lavador/ Enfriador Chimenea	Lavador/ Enfriador Chimenea	Enfriador/ Lavador Ciclón Chimenea
Reactivo	CaOH ₂	No	No	No	—
Temperatura salida de gas	130	250	160	300	75
Cenizas generadas	—	140 kg/día	67 kg/día	—	—
Manejo de cenizas	No	No	No	No	No
Tratamiento de agua	Reciclaje	Desinfección	No	No	Floculación
Almacenamiento	Adecuado	Adecuado	Adecuado	No adecuado	Adecuado
Combustible	Gas natural	Gas LP	Gas natural	Gas LP	Gas LP

Nota: CC1 = cámara de combustión primaria; CC2 = cámara de combustión secundaria; - = no especificado; RPI = residuos peligrosos industriales; RPBI = Residuos peligrosos biológico-infecciosos; NTR = Neutralizador.

CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS

Además de los datos de operación obtenidos de las plantas de incineración, se tomaron muestras de mezclas de cenizas en los contenedores de almacenamien-

to temporal. En la planta No. 1 se tomaron muestras separadas de cenizas de fondo y volantes. No se obtuvo ninguna muestra en las plantas No. 4 y 10 debido a que el día de la visita no se encontraban en operación.

6	7	8	9	10
RPBI	RPBI Patológicos	RPBI, RPI Medicamentos y agroquímicos	RPBI	RPBI Medicam. Caducos
725	800	1,000	950	640
1,000	1,100	1,000	1,250	970
2 seg.	2 seg.	4.3 seg.	< 7 seg.	2 seg.
Enfriador	Recirculación	Quencher	Lavado	Medio adsorbente
NTR	Lavador	Lavador	NTR	Chimenea
Lavador	NTR	NTR	Chimenea	
Chimenea	Sedimentador Chimenea	Chimenea		
NaOH	NaOH	CaOH ₂ /NaOH	NaOH	No
80	200	79	200	330
250 kg/día	300 Kg/sem	1,000 kg/día	—	100 kg/día
No	No	No	Reincineración (Volantes)	No
Trat. físico-químico	Floculación/ Recirculación	Trat. físico-químico	Sedimentación	Incineración
Adecuado	Adecuado Gas LP	Adecuado Gas LP	Adecuado Gas LP	Adecuado Gas LP

Todas las muestras de cenizas fueron caracterizadas en cuanto a la pérdida de materia volátil y metales lixiviables. La pérdida de materia volátil se determinó de acuerdo con el método 2540 E de la APHA (1998). Los metales lixiviables se extrajeron de acuerdo con el método descrito en la NOM-053-ECOL-1993, y se cuantificaron por espectrofotometría de emisión atómica por plasma, empleando el método EPA 6010A. Los resultados de estas determinaciones analíticas se muestran en el cuadro 3.

En el caso de la pérdida de materia volátil se encontraron muestras que presentan valores muy pequeños, desde 0 hasta 2.7%, pero otro grupo tuvo pérdidas de materia volátil muy elevadas, todas mayores a 10% y una cercana al 20%. A partir de estos

resultados, se encontró una relación directa entre el mezclado de los residuos en la cámara de combustión primaria y la pérdida de materia volátil de las cenizas resultantes; es decir, en los hornos rotatorios y de semi-suspensión, donde existe mejor contacto de los residuos con el aire y la temperatura, las cenizas presentan valores mínimos de pérdida de materia volátil, mientras que todos los hornos de lecho fijo generan cenizas con pérdida de materia volátil superior al límite dispuesto en el PROY-NOM-098-ECOL-2000, como se aprecia en la gráfica 2.

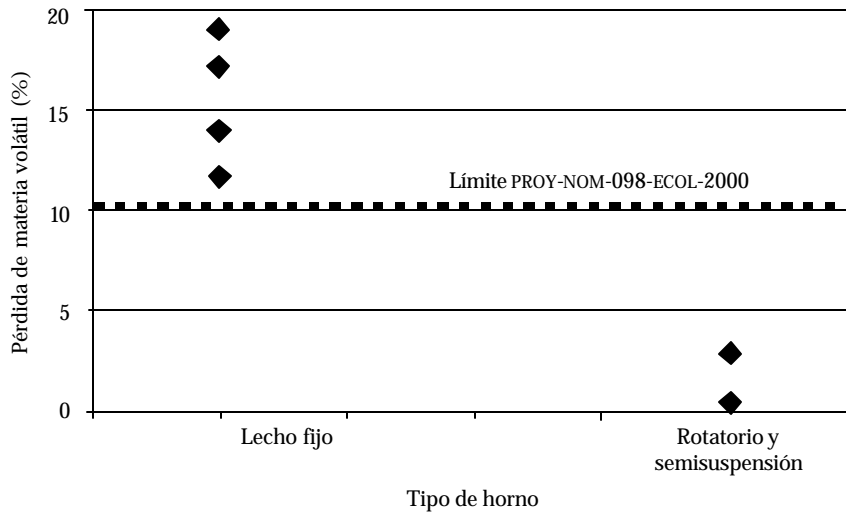
En cuanto a metales lixiviables, resalta el hecho de que las muestras de cenizas de fondo y volantes de la planta No. 1 presentan el comportamiento esperado, encontrando cantidades de Cd, Cr, Ni y Pb

CUADRO 3. DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE MATERIA VOLÁTIL Y METALES LIXIVIALES EN CENIZAS DE INCINERACIÓN

PLANTA	1	2	3	5	6	7	8	9	LD	LMP	
PARÁMETRO	FONDO	VOLANTES							mg/L		
Pérdida de materia volátil (%)	19.0	-	11.5	0.3	14.0	0.0	17.2	2.7	0.0	10%	
<i>Metales liviviables (mg/L)</i>											
As	0.0016	0.0013	0.0243	0.1847	0.0508	< LD	0.0011	< LD	0.0057	0.001	5
Ba	< LD	3.36	0.47	0.64	0.73	3.48	< LD	0.18	2.26	0.034	100
Cd	1.05	3.91	0.03	< LD	0.04	< LD	20.5	< LD	< LD	0.01	1
Cr	< LD	6.94	0.15	0.24	0.08	< LD	< LD	< LD	0.21	0.01	5
Ni	3.44	29.02	0.28	0.04	0.26	0.53	1.6	0.53	0.62	0.014	5
Hg	0.00197	0.0108	0.00312	0.00174	0.00203	0.08	0.00227	0.00131	0.00128	0.000053	0.2
Ag	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0.03	5
Pb	3.1	25.86	< LD	< LD	0.19	< LD	0.35	< LD	< LD	0.017	5
Se	0.0119	0.0041	0.0044	0.0034	0.0054	.00384	0.0074	0.0044	0.0027	0.001	1

Nota 1: LD= Límite de detección del laboratorio de espectrofotometría de absorción y emisión atómica del CENICA; LMP = límite máximo permisible (NOM-052-ECOL-1993); - = No se determinó; g = Fuera del LMP.

GRÁFICA 2. RELACIÓN DE LA CAPACIDAD DE MEZCLADO DE LOS TIPOS DE INCINERADORES
CON LA PÉRDIDA DE MATERIA VOLÁTIL DE LAS CENIZAS QUE GENERAN



que rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-052-ECOL-1993 en la muestra de cenizas volantes. En las cenizas de fondo el Cd también rebasa el límite máximo permisible, aunque ésta puede ser una condición inusual debido a la variabilidad de la composición de los residuos hospitalarios.

En el resto de las muestras no se encontraron metales en concentraciones superiores a los límites máximos permisibles, probablemente debido al manejo conjunto de cenizas volantes y de fondo que ocasiona la dilución de la concentración de metales lixiviables. Este no es el caso de la muestra de cenizas de la planta No. 9, ya que cuenta con un manejo separado para los diferentes tipos de cenizas.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Después de obtener los parámetros de operación de las plantas de incineración y la caracterización de las cenizas, se aplicó el método de evaluación planteado, asignando puntuaciones a los parámetros de operación de cada planta de acuerdo con los criterios

mostrados en el cuadro 1. El resultado de la evaluación del desempeño de los incineradores se presenta en el cuadro 4, donde se incluye el promedio de la puntuación obtenida por planta y por cada uno de los parámetros evaluados. El promedio se realizó con base en los datos disponibles para cada caso, debido a la falta de información para algunas plantas en cuanto a dos parámetros de combustión.

De acuerdo con la metodología aplicada, en la cual se asignan puntuaciones de 0 a 2, se observa que la planta No. 4 obtuvo una puntuación promedio menor a uno, lo que representa un desempeño inferior a lo que se considera una operación satisfactoria. Las plantas No. 2 y 10 escasamente superaron esta cifra; y las plantas 1, 3, 5 y 7 representaron un mejor desempeño con promedios de 1.3 y 1.4. Aunque ninguna planta de incineración alcanzó una evaluación excelente, las plantas número 6, 8 y 9 se acercan a esta condición.

En general, los mejores cumplimientos se registraron en la temperatura y el tiempo de retención en la cámara de combustión secundaria, mientras que el de-

CUADRO 4. EVALUACIÓN DE LAS PLANTAS DE INCINERACIÓN

PLANTA											
PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	PROMEDIO
<i>Criterios de combustión</i>											
Temperatura en CC1	0	0	1	1	2	0	2	2	2	0	1
Temperatura en CC2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1.9
Tiempo en CC2	-	2	-	2	-	2	2	2	2	2	2
Pérdida de materia volátil	0	0	2	-	0	2	0	2	2	-	1
<i>Criterios para el tratamiento de gases</i>											
Control de partículas y gases ácidos	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1.5
Temperatura de salida	2	0	2	0	2	2	1	2	1	0	1.3
<i>Otros criterios importantes</i>											
Manejo de cenizas	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0.1
Tratamiento de agua	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	1.6
Almacenamiento	2	1.1	2	0	2	2	2	2	2	2	1.8
Promedio	1.3		1.3	0.8	1.4	1.6	1.4	1.8	1.7	1.1	1.35

Nota: CC1 = Cámara de combustión primaria; CC2 = Cámara de combustión secundaria; - = No especificado.

sempañó más bajo se encontró en el manejo de cenizas; nueve de las diez empresas manejan las cenizas volantes y de fondo de forma conjunta, disponiéndolas como un residuo no peligroso.

CONCLUSIONES

El promedio global de desempeño de las plantas y del cumplimiento de parámetros, de acuerdo con el criterio de evaluación utilizado en este trabajo, fue de 1.35 en una escala de 0 a 2, demostrando que la operación general de las plantas de incineración es satisfactoria.

Se encontraron instalaciones cuya operación e infraestructura es eficiente, sobresaliendo la planta No.

8, que cuenta con equipos adecuados para la incineración de los residuos peligrosos industriales, y que obtuvo un promedio de cumplimiento de 1.8 (el más alto) y fue una de las que generan cenizas con muy baja pérdida de materia volátil.

En general, el desempeño de las plantas fue muy bueno en cuanto a los parámetros, como la temperatura de operación de la cámara de combustión secundaria, el tratamiento del agua residual y el almacenamiento de los residuos; en este grupo también se puede incluir el tiempo de retención de los gases en la cámara de combustión secundaria, aunque los datos referentes a este parámetro fueron proporcionados por los operadores de las plantas.

No obstante, también se encontraron instalaciones con bajo desempeño, como la planta número 4, que opera de forma deficiente en muchos de los parámetros evaluados.

Existen aspectos muy importantes que deben mejorarse para incrementar la eficiencia de los incineradores en México; uno de los principales es el diseño de las parrillas en la cámara de combustión primaria, ya que actualmente la mayoría de los equipos son de lecho fijo. Para mejorar el mezclado y consecuentemente la calidad de la combustión de los residuos en la cámara de combustión primaria, debe emplearse tecnología más eficiente como los hornos de alimentación continua. Asimismo, se deben controlar las temperaturas mínimas de combustión, ya que algunas plantas presentaron temperaturas menores a 800 °C en la cámara de combustión primaria, la cual no garantiza la combustión adecuada de los residuos.

Es importante destacar que en México, se contempla muy poco el tratamiento adecuado de las cenizas de fondo y volantes, las cuales pueden contener concentraciones importantes de metales capaces de lixiviar por lo que deberían separarse y, al menos las cenizas volantes, estabilizarlas antes de ser enviadas a su disposición final.

Muchas de las deficiencias encontradas de acuerdo con el método de evaluación utilizado se deben a dos factores principales: (i) dentro de los instrumentos de gestión para la operación de incineradores en México (autorización, Licencia Ambiental Única o PROY-NOM-098-ECOL-2000), no existen especificaciones precisas sobre algunos de los parámetros incluidos en la metodología propuesta en este trabajo; (ii) el PROY-NOM-098-ECOL-2000 ha servido como referencia para establecer límites de emisión a los incineradores, pero no tiene validez oficial hasta que sea publicado como Norma Oficial Mexicana, es decir, a la fecha no existen lineamientos oficiales para incineradores en México.

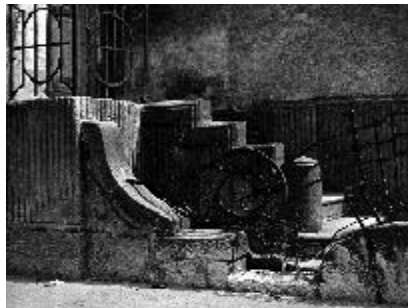


Es importante mencionar que durante la aplicación de la metodología planteada se encontraron algunas limitaciones para valorar el desempeño de las plantas, ya que la evaluación podría mejorarse si: (i) se comprobaran los valores proporcionados para el tiempo de retención de los gases en la cámara de combustión secundaria mediante un cálculo con el volumen de la cámara y el flujo de los gases y (ii) se incluyera la comparación de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera establecidos en la normatividad correspondiente, contra las mediciones reales de emisiones de cada planta, información que a la fecha no se ha podido obtener.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WEF 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. E.U.A., 20a. edición.

- Brunner, C. R. 1993. *Hazardous Waste Incineration*. McGraw-Hill. E.U.A. 2a edición. 460 pp.
- California Air Resources Board. 1990. Dioxins Airborne Toxic Control Measure for Medical Waste Incinerators. Final Regulation Order. <http://www.arb.ca.gov/toxics/dioxins/info.htm>
- Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, Serie L 332, 28 de diciembre de 2000, pp. 91-111.
- DGMIC (Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes) 2001. Diagnóstico de la situación actual de la incineración en México. *III Foro internacional de incineración de residuos*. México, D.F., Noviembre 6 y 7.
- DGMRAR (Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas) 1998. La incineración dentro del contexto de la política nacional de residuos peligrosos. *Foro Internacional de Incineración de Residuos Peligrosos*. México, D.F., 27 y 28 de agosto.
- IAWG International Ash Working Group. 1997. *Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. Elsevier, Amsterdam. pp. 974.
- Lanier, W.S. 1998. Control of Dioxin and Furan Emissions from Waste combustion systems. *Foro internacional de incineración de residuos peligrosos*. México, D.F.
- Matsumura, H. 1998. Experience for Incineration of Industrial Waste in Japan. *Foro internacional de incineración de residuos peligrosos*. México, D.F.
- Midwest Research Institute 1989. *Hospital Waste Incinerator Field Inspection and Source Evaluation Manual*. USEPA, Washington, DC. pp. 244. (EPA 340/1-89-001).
- PROY-NOM-098-ECOL-2000 Protección ambiental. Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. *Diario Oficial de la Federación* 8 de septiembre de 2000.
- USEPA 1990. Operation and Maintenance of Hospital Medical Waste Incinerators. Cincinnati. pp. 108. (EPA/625/6-89/024).



Anabell Rosas Domínguez es Subdirectora de Investigación sobre Residuos (anrosas@ine.gob.mx), **Angélica Peña Luna** (correo-e: apena@ine.gob.mx), **Graciela G. Ramos Rodríguez**, **Chiaki Izumikawa**, **Guillermo Encarnación Aguilar**, **Juan A. Velasco Trejo** y **Sergio Flores Martínez**, trabajan en la Dirección de Investigación en Residuos y Proyectos Regionales y **Adrián Díaz Ramos** (correo-e: adramos@ine.gob.mx), **Ana L. Magdalena Gutiérrez**, **Luis H. García Romero** y **Paola Salgado Figueroa** están adscritos a la Subdirección de Investigación y Caracterización Analítica de Contaminantes del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) del Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNAT.

Fotografías: Manuel Álvarez Bravo. Trabajadores del fuego, 1935 (página 27). Quema dos, 1857 (página 31). Chapil de leña, 1927 (página 39). Escalera con barandal, principio de la década de 1950 (página 40).