

JUGANDO CON FUEGO

INCINERACION DE RESIDUOS PELIGROSOS

GREENPEACE

- Segunda Edición - 1993

Informe preparado por Pat Costner y Joe Thornton -Edición en español por Greenpeace España y Greenpeace Cono Sur

INDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1- INCINERACION: TEORIA VERSUS PRACTICA

- *Predicción teórica del rendimiento de la incineradora
 - Eficiencia de Destrucción y Eliminación
 - Ensayos de combustión
 - Incinerabilidad de los PCOPs
 - Acumulación del error
 - Efecto de Histéresis
- *Control del funcionamiento de la incineradora
 - Perturbaciones de combustión a gran escala
 - Perturbaciones de combustión a pequeña escala
- *Supervisión del funcionamiento de la incineradora
 - Monóxido de carbono e hidrocarburos totales
 - Temperatura
 - Disponibilidad de oxígeno

2- EMISION DE RESIDUOS NO QUEMADOS

- *Emisiones a la atmósfera
- *Deposición en los residuos de la incineradora
- *Deposición en los dispositivos de control de polución
- *Emisiones fugitivas
- *Pérdidas durante el transporte de residuos

3- PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA (PICs)

- *Cantidad de PICs en las emisiones a la atmósfera
- *Identificación de los PICs presentes en las emisiones atmosféricas
- *PICs en las cenizas
- *PICs en aguas residuales
- *PICs más peligrosos: dioxinas y otros haluros de carbono

4- INCINERACION DE RESIDUOS CON METALES PESADOS

- *Factores que afectan a la distribución de los metales
- *Emisiones de metales a la atmósfera
- *Presencia de metales en los residuos de la incineradora

5- IMPACTO DE LA INCINERACION SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

- *Toxicidad
 - Dioxinas y otros haluros de carbono complejos
 - PICs no halogenados
 - Metales pesados
- *Destino ambiental y vías de la exposición a los contaminantes
 - Exposición a través de la cadena alimenticia acuática
 - Exposición a través de cosechas
 - Exposición a través de leche, carne y huevos
- *Incineración y contaminación por haluros de carbono

6- REFERENCIAS

RESUMEN

Los informes gubernamentales, industriales y la literatura científica en general hacen referencia frecuentemente a la escasez de información sobre los procesos, funcionamiento y emisiones de la incineración de residuos peligrosos, así como a la ausencia de datos esenciales para la predicción del impacto sobre el medio ambiente y sobre la salud pública de dichas emisiones.

Los datos disponibles indican, no obstante, que las incineradoras de residuos peligrosos emiten al medio ambiente residuos químicos sin quemar, metales y productos derivados de una combustión incompleta, tanto en sus emisiones gaseosas como en sus residuos sólidos y líquidos. Entre dichas sustancias se encuentran productos sumamente tóxicos, persistentes y bioacumulativos (p. ej. dioxinas cloradas, furanos y PCBs) que se consideran actualmente contaminantes globales del medio ambiente, la cadena alimenticia y los tejidos y fluidos humanos, incluyendo la leche materna.

INCINERACION: TEORIA VERSUS PRACTICA

En teoría, una incineradora correctamente diseñada y manejada debería ser capaz de transformar residuos hidrocarbonados en dióxido de carbono y agua solamente. En la práctica, las incineradoras a escala industrial están lejos de alcanzar este objetivo:

Los residuos que se queman en estos incineradores son mezclas químicas complejas, que incluyen sustancias refractarias, como los residuos halogenados y metales pesados incombustibles.

Incluso bajo condiciones óptimas, todas las incineradoras emiten residuos sin quemar y parcialmente quemados en los gases de la chimenea, cenizas u otros residuos. Los productos de combustiones incompletas (PICs) - nuevos contaminantes que se forman de residuos parcialmente quemados - incluyen miles de sustancias químicas, de las que se ha identificado sólo una fracción incluso con las pruebas más exhaustivas. Hasta la fecha, no se han realizado pruebas para identificar y cuantificar las emisiones de las incineradoras durante situaciones de perturbación de la combustión.

Las incineradoras sufren constantes fluctuaciones en la composición de residuos, velocidades de alimentación de los mismos y atomización, así como en la disponibilidad de oxígeno, turbulencias y temperaturas. Estas fluctuaciones pueden ser, desde breves alteraciones locales, hasta perturbaciones completas de la combustión, y aumentan la emisión de residuos sin quemar o parcialmente quemados.

El ajuste de las condiciones operativas para minimizar una de estas emisiones puede tener un efecto contrario sobre otra. Por ejemplo, un aumento de temperatura conduce normalmente a una mejora de la eficiencia de combustión de ciertos residuos, pero produce también un aumento de la emisión de metales pesados y favorece la producción de perturbaciones durante la combustión de residuos volátiles de alimentación discontinua.

La norma para la elección y control de una incineradora -la eficiencia de destrucción y eliminación (ED), durante ensayos de combustión, de ciertas sustancias químicas previamente seleccionadas - es, en el mejor de los casos, un remoto y leve indicador de las emisiones reales de estas sustancias durante el funcionamiento de rutina. La ED es todavía un indicador peor de las emisiones de otros residuos químicos, y no es válida para medir productos de combustiones incompletas y metales pesados. Las medidas de ED, realizadas durante ensayos de combustión, no guardan, por tanto, relación alguna con el impacto sobre la salud pública y el medio ambiente que tendrá la incineradora durante un funcionamiento continuo de rutina.

Las EDs que aparecen en los informes pueden sobrestimar considerablemente las capacidades de destrucción reales, debido a la acumulación de errores debidos a la imprecisión inherente a las múltiples medidas efectuadas para evaluar la ED. Si se considera un efecto acumulativo de error, las ED evaluadas como un 99,99 % pueden reducirse a un 79 %. Si, además, no se ha tenido en cuenta el efecto de histéresis - la retención, dentro del sistema de incineración, de las sustancias preseleccionadas

para realizar la prueba, así como de otros componentes de los residuos, y su emisión gradual mucho tiempo después de completarse el muestreo de los gases de combustión - pueden obtenerse resultados de emisión de sustancias no quemadas que son varias veces inferiores a los reales.

EMISION DE RESIDUOS NO QUEMADOS

Incluso si una incineradora pudiera alcanzar una ED de un 99,99% durante cada segundo de funcionamiento, continuaría emitiendo al medio ambiente cantidades significativas de residuos no quemados. Por ejemplo, una incineradora de tamaño comercial medio, que funcionara con una ED del 99,9% y tratara 31.500 toneladas de residuos al año, emitiría al aire unas 31,5 toneladas de residuos no quemados al año, sin contar con las cantidades depositadas en las cenizas, en los "volantes" y en los residuos sólidos y líquidos de ciertos dispositivos de control de polución.

Asimismo, durante el almacenamiento, manejo y transporte rutinario de los residuos, se producen emisiones fugitivas al aire, que son superiores o comparables a las emisiones en los gases de la chimenea. Existe también el riesgo de vertido de residuos, durante su transferencia y transporte o debidos a accidentes de efectos catastróficos.

PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA (PICs)

Fragmentos de residuos químicos parcialmente quemados pueden recombinarse durante una combustión incompleta, en hornos, chimeneas y/o dispositivos de control de contaminación, formando cientos o quizás miles de nuevos productos químicos. En ciertos casos, estos productos de combustión incompleta (PICs) son aún más tóxicos, persistentes y bioacumulativos que los residuos originales.

En una incineradora de tamaño comercial medio, el total de PICs emitidos se estima entre 2,6 y 2.205 toneladas anualmente, dependiendo de la composición de los residuos y de las condiciones operativas.

De los miles de PICs que pueden formarse, sólo se han identificado completamente unos 100. Los PICs que se forman y emiten en incineradoras que queman residuos halogenados incluyen dioxinas polihalogenadas y dibenzofuranos, PCBs y hexaclorobenceno. Aunque se sabe que las condiciones operativas influyen en las cantidades de PICs formados y emitidos, no se ha desarrollado una tecnología que impida su formación.

EMISION DE METALES PESADOS

La incineración no destruye los metales; simplemente los redistribuye. Se han identificado al menos 19 metales - incluyendo mercurio, plomo y cadmio - en los humos de la chimenea, cenizas y otros restos de incineradoras de residuos industriales. En algunos casos, la incineración transforma los compuestos metálicos en formas más tóxicas, fácilmente inhalables o ingeribles por seres vivos, o más fácilmente solubles en las cenizas de incineración depositadas en vertederos.

La distribución de los diferentes metales en las emisiones al aire, cenizas, residuos de dispositivos de control de polución, etc., es variable. En los humos puede emitirse hasta un cincuenta por cien de los metales más volátiles, incluyendo plomo y mercurio, que entran en la incineradora. El porcentaje de metales emitidos con dichos gases aumenta con la temperatura y el contenido en cloro de los residuos.

IMPACTO AMBIENTAL Y SOBRE LA SALUD

Las incineradoras son fuente de multitud de contaminantes tóxicos, persistentes y bioacumulativos, como dioxinas, furanos, PCBs y otros haluros de carbono menos conocidos. Estas sustancias, que son muy resistentes a los procesos de degradación natural, están distribuidos a escala mundial en el aire, agua, suelo, cadena alimenticia y en la población humana. Los halocarbonos, compuestos presentes en los

PICs, son sumamente tóxicos. Producen cáncer, defectos de nacimiento, daños neurológicos, supresión inmunológica, etc., obstaculizando la reproducción y crecimiento en dosis extremadamente pequeñas. Las vías primarias de exposición para seres humanos son la inhalación e ingestión de pescado contaminado, productos lácteos, carnes, huevos, y cosechas expuestas a las emisiones de las incineradoras.

Las emisiones de las incineradoras contienen, asimismo, otros PICs no halogenados, muchos de los cuales -por ejemplo, benceno, ésteres del ácido ftálico, y benzo-a-pireno- son cancerígenos, teratógenos y tóxicos fisiológicos y reproductivos.

Las incineradoras contribuyen al incremento de los niveles de metales que circulan en la biosfera del planeta en cantidades potencialmente peligrosas. Los efectos demostrados de algunos de los 19 metales, que se ha comprobado que emiten las incineradoras, incluyen efectos cancerígenos, teratógenos, y toxicidad para el sistema nervioso en dosis sumamente bajas.

Hasta el momento, se han realizado muy pocos esfuerzos para examinar los índices de salud de comunidades situadas en las cercanías de incineradoras de residuos peligrosos. No obstante, se han publicado datos de altos índices de cánceres y enfermedades respiratorias, así como alteraciones reproductoras, en cinco de estas comunidades.

INTRODUCCION: *JUGANDO CON FUEGO*

A lo largo de la historia, la eliminación de residuos peligrosos ha estado basada en suposiciones falsas:

El vertido directo en el agua presupone que el efecto de la disolución y de la "*capacidad asimilativa*" de la naturaleza volvería inocuos los posibles productos peligrosos de los residuos vertidos. Esta aproximación ha demostrado ser fútil para las sustancias resistentes a los procesos de degradación natural, las cuales se acumulan en los tejidos vivos y aumentan su concentración a lo largo de la cadena alimenticia. Esto viene evidenciado por el incremento gradual de estos contaminantes en los ecosistemas acuáticos de todas las naciones industrializadas.

El vertido de los residuos peligrosos en depósitos en el suelo, en pozos profundos, galerías de minas o canteras, presupone que los medios de almacenamiento, naturales o artificiales, pueden inmovilizar los residuos hasta que éstos se vuelvan inocuos (lo que en muchos casos quiere decir indefinidamente). La experiencia ha demostrado que los métodos de almacenamiento subterráneo tan sólo retrasan, más que evitan, la filtración de los residuos a las aguas subterráneas, superficiales y al aire.

Debido al aumento de la oposición, en la opinión pública, al vertido o almacenamiento subterráneo de los residuos peligrosos, los productores de residuos y sus reguladores gubernamentales tienden a favorecer la incineración, que traslada el lugar de depósito al aire.

Este auge de la incineración como medio de eliminación preferente no se debe a que se haya comprobado científicamente que elimina los residuos de forma inocua para la salud y el medio ambiente, sino porque es relativamente barato y no presenta problemas de posible responsabilidad legal frente a terceros. Al igual que con el vertido o el almacenamiento subterráneo, la incineración de residuos peligrosos se basa en muchas suposiciones, muchas de las cuales se ha comprobado ya que no son ciertas. Otras de estas suposiciones son claramente insostenibles desde el punto de vista científico y los conocimientos actuales:

La dilución en la atmósfera de los contaminantes persistentes y bioacumulativas, que se emiten con los gases de la chimenea es tan inefectiva para proteger la salud pública y el medio ambiente como descargar estas sustancias al agua.

Las mediciones de combustión puntuales, en condiciones de funcionamiento cuidadosamente controladas, de sustancias químicas previamente seleccionadas, no reflejan el funcionamiento de la incineradora en condiciones rutinarias, en las cuales multitud de factores pueden variar considerablemente.

La eficiencia de destrucción y eliminación (ED), durante los experimentos de combustión, de una o dos sustancias previamente seleccionadas, no puede predecir adecuadamente las ED de los residuos, que son una mezcla variable de numerosos compuestos químicos.

Incluso durante las pruebas de combustión, las ED han demostrado ser una mala medida del funcionamiento de la incineradora debido, en gran parte, a limitaciones, errores e imprecisiones (de hasta un +/- 50%) de las mediciones necesarias.

Las EDs son sólo mediciones de las sustancias preseleccionadas, y no ofrecen indicación acerca de los productos de combustión incompleta (PIC) y metales pesados emitidos, no sirven para predecir el impacto ambiental y sobre la salud de las emisiones rutinarias de la incineradora.

En los estudios más rigurosos realizados se han identificado sólo una parte de la cantidad total de contaminantes existentes en los gases de las incineradoras. De estos PICs restantes - que van de unos cientos a varios miles - no se conoce su naturaleza química, ni su efecto sobre la salud o el medio ambiente.

La información toxicológica existente, de las sustancias identificadas en los gases, es bastante rudimentaria y se realizó para una exposición de dichas sustancias a dosis altas. Por ello, no sirve de indicación de los posibles efectos que tendría una exposición prolongada a una mezcla de dichas sustancias a dosis bajas.

No se ha demostrado científicamente que los otros métodos utilizados para evaluar la eficiencia de las combustiones, como el monóxido de carbono y los hidrocarburos totales, guarden relación con las identidades, cantidades o efectos potenciales de los numerosos compuestos existentes en los gases emitidos por las incineradoras.

Una tecnología de eliminación que, aparentemente, hace que los residuos se desvanezcan en el aire resulta muy atractiva. Frecuentemente pueden rastrearse los residuos arrojados al agua o a la tierra, y encontrarse así el agente originante que es, desde dicho momento, responsable financieramente de los posibles daños causados. Pero, una vez quemados los residuos, los productos de incineración -emisiones al aire, cenizas, y residuos de los dispositivos de control- pueden rastrearse, si es que es posible, sólo hasta la incineradora pero no hasta el generador del residuo.

El atractivo de la incineración ha sido, de hecho, tan grande, que esta técnica se ha vuelto el negocio más lucrativo y de mayor crecimiento de la década, aunque se ha realizado muy poco análisis crítico de las múltiples suposiciones sobre las que se basa su atractivo. Este informe está basado en datos procedentes de estudios científico, industriales y gubernamentales publicados, y examina muchas de dichas suposiciones, incluyendo el funcionamiento de la incineradora, el control, las emisiones al aire, residuos sólidos, y - en resumen - los puntos con impacto potencial sobre la salud y el medio ambiente.

1.- INCINERACION: TEORIA VERSUS PRACTICA

Una incineradora correctamente diseñada debería, en teoría, transformar los hidrocarburos sencillos solamente en dióxido de carbono y agua. La experiencia práctica demuestra, no obstante, que ni siquiera los mejores sistemas de combustión pueden hacer que la reacción se complete hasta este punto:

"La combustión completa de todos los hidrocarburos para dar solamente agua y dióxido de carbono es un modelo teórico que podría tener lugar sólo en condiciones ideales... Los sistemas de combustión reales (p. ej., incineradoras) sin embargo producen casi siempre PICs (productos de combustión incompleta), algunos de los cuales se ha demostrado que son muy tóxicos." [USEPA* 1990]

Además, pocos de los residuos industriales que se queman en incineradoras están formados por hidrocarburos sencillos. Muchos son mezclas complejas de productos químicos que contienen metales, halógenos y otros elementos.

Durante y después de la combustión, los componentes de los residuos se disocian y recombinan, formando cientos, o incluso miles, de nuevas sustancias llamadas productos de combustión incompleta (PICs) [USEPA 1989b]. Los metales, por supuesto, no se destruyen sino que se distribuyen entre las emisiones al aire, las cenizas y los residuos de los dispositivos de control de polución, junto con algunos PICs y parte de los residuos que escapan sin ser quemados ni retenidos.

Los procesos industriales que generan productos químicos comerciales han sido, generalmente, bien estudiados y se conocen detalladamente. No obstante, hace poco que los científicos han empezado a estudiar los complejos procesos físicos y químicos que tienen lugar en las incineradoras que queman los residuos procedentes de dichos procesos comerciales.

Todavía no se han desarrollado métodos que permitan la supervisión directa del funcionamiento de la incineradora ni del grado en que convierte residuos peligrosos en sustancias inocuas durante el funcionamiento diario. No existen métodos, por ejemplo, para identificar y cuantificar completamente los residuos no quemados y PICs en los gases emitidos, ya sea en ensayos de combustión o durante el funcionamiento habitual:

"No disponemos de técnicas de muestreo y análisis que permitan identificar o cuantificar muchos de los posibles compuestos emitidos... En el momento actual, no es posible en la práctica diseñar un sistema de supervisión para identificar y cuantificar individualmente los compuestos tóxicos existentes en los gases de combustión de las incineradoras." [USEPA 1989a]

Debido a ello, para la predicción teórica y comprobación posterior del rendimiento de una incineradora debemos basarnos en mediciones de indicadores indirectos, cuya validez para garantizar un funcionamiento seguro es en muchos casos, no obstante, cuestionable. (*) USEPA: Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos.

PREDICCIÓN TEÓRICA DEL RENDIMIENTO DE LA INCINERADORA

Los operarios y responsables de la normativa legal mantienen que la eficiencia de destrucción y eliminación (ED), medida durante ensayos de combustión, de ciertas sustancias químicas previamente seleccionadas, llamadas principales componentes orgánicos peligrosos (PCOPs), refleja el rendimiento de la incineradora durante la combustión rutinaria de residuos, con la suficiente precisión y exactitud para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública.

A continuación describiremos cada uno de estos factores, su papel en la predicción del rendimiento de la incineradora y sus limitaciones en dicha predicción. Trataremos las implicaciones potencialmente importantes de un efecto acumulativo del error, en las mediciones realizadas durante el muestreo y análisis, y en el cálculo de las EDs. Asimismo, trataremos el efecto de histéresis, que puede hacer disminuir las EDs en "órdenes de magnitud completos."

Eficiencia de Destrucción y Eliminación (ED)

La ED de una incineradora es el cociente entre la cantidad de la sustancia seleccionada (un PCOP) emitida al aire, tras haber pasado por la incineradora y los dispositivos de control de polución, y la cantidad de PCOP inicialmente introducida en la incineradora. Los PCOPs elegidos para realizar estas pruebas se supone que son los componentes principales de los residuos que se van a quemar o aquellas sustancias que serán más difíciles de destruir.

Por ejemplo, una ED de un 99,99 por cien indica que en los gases de la chimenea se ha detectado un 0,01 por cien del PCOP seleccionado, tras haber pasado por la incineradora y los dispositivos de control de polución. Ello no indica, no obstante, que se haya destruido realmente un 99,99 por cien de dicho PCOP: *"Las normas anteriores (basadas en EDs) sólo cubren los PCOPs existentes en los gases de la chimenea pero no consideran otros posibles efluentes, como productos de combustión incompleta (PICs) en los mismos gases, o restos de estos PCOPs, metales, u otros compuestos químicos existentes en las cenizas de la incineradora, el agua utilizada y partículas arrastradas por el aire. Dado que estos efluentes pueden ser igual o más peligrosos todavía que los mismos PCOPs, resulta evidente la necesidad de investigar para estudiar las características cuantitativas y cualitativas de todos los posibles efluentes, así como de obtener los datos de ingeniería necesarios para mantener el control."* [Trenholm 1987]

En una serie de ensayos, una mezcla de PCOPs que al quemarse presentaba la tasa de destrucción más alta producía asimismo el nivel más alto de un PIC (benceno) lo que llevó a los investigadores a la conclusión de que las *"EDs muy elevadas no son siempre indicativas de las emisiones de PICs"*. [Chang 1988] Otros estudios han documentado asimismo la concurrencia de tasas de destrucción altas con emisiones de PICs elevadas. [Staley 1985; Huffman 1985; Clark 1986]. Un grupo de investigadores resumió sus conclusiones en la siguiente frase:

"Incluso las EDs de un 99,99 % no garantizan necesariamente la minimización de las emisiones." [Huffman; 1985]

Las mediciones de las EDs han resultado también ser altamente inconsistentes e impredecibles a lo largo del tiempo. Un equipo de científicos encontró variaciones de las eficiencias de destrucción de hasta *"un orden de magnitud"*, que no guardaban relación con los parámetros operativos o indicadores equivalentes, como las emisiones de monóxido de carbono. [Mason 1988]

El Comité Científico Asesor de la USEPA publicó la siguiente advertencia acerca de la fiabilidad de las ED como criterios para la protección del medio ambiente y la salud pública de las emisiones de las incineradoras de residuos peligrosos:

"Las EDs estándar actuales de cuatro nueves (99,99 %) permiten, en teoría, emisiones de niveles de PICs que pueden representar un riesgo significativo para la salud humana".

Ensayos de combustión

La ED de una incineradora es una medición de su funcionamiento durante un ensayo de combustión, estructurada de forma tal que suministra *"sólo una «instantánea» de la eficiencia de la incineradora durante un ensayo de combustión"*. [Staley 1985]. Basándonos en un estudio de las incineradoras comerciales de los Estados Unidos y de sus datos de ensayos de combustión, las muestras de gases de la chimenea recogidas y analizadas para la determinación de las EDs pueden representar tan sólo 1/650.000 de la cantidad diaria de gases emitidos por la chimenea. En los ensayos de combustión realizados para grandes hornos de cemento, dichas muestras de gases pueden representar menos de 1/2.000.000 de las emisiones diarias de dichos gases. [Stein 1990]

De la cantidad total de contaminantes presentes en los gases de la chimenea, en cualquier prueba de combustión, se han podido identificar únicamente del 1 al 60 %. [USEPA 1989b] No se ha realizado una identificación completa de los productos emitidos en dichos gases, y no es probable que dicha

identificación se realice en un futuro próximo:

"Las emisiones de PICs están formadas por miles de compuestos distintos, algunos de los cuales se encuentran en cantidades extremadamente pequeñas, otros no pueden detectarse y cuantificarse sin técnicas de muestreo y analíticas muy elaboradas y costosas. A fines de autorización legal, estas técnicas no deben realizarse en ensayos de combustión, sino que deben realizarse (in situ) mediante pruebas de investigación. Hasta la fecha se han realizado muy pocas de estas pruebas para identificar y cuantificar los PICs de una muestra de emisiones normales y, en los casos en que se ha intentado, dicha identificación ha fracasado debido a la falta de técnicas de muestreo y análisis para identificar o cuantificar muchos de los posibles compuestos emitidos, no disponiéndose tampoco de datos toxicológicos para la totalidad de dichos compuestos." [USEPA 1990]

Tanto los operarios como los funcionarios responsables de la normativa legal señalan frecuentemente que las EDs del 99,99 % obtenidas durante ensayos de combustión son garantía suficiente de una baja probabilidad de efectos perjudiciales sobre la salud o el medio ambiente. Los científicos, no obstante, han advertido que las condiciones de funcionamiento durante dichos ensayos de combustión están controladas con mucha más precisión que la que puede existir durante un funcionamiento rutinario:

"Es razonable suponer que, durante los ensayos de combustión, el estado y control de la incineradora serán óptimos y que la atención del operador será la mayor posible, existiendo asimismo un cuidadoso control sobre la composición y características de los residuos alimentados." [Cook 1989]

La tenue relación entre el funcionamiento de la incineradora durante ensayos de combustión y el existente en condiciones de funcionamiento rutinario ha sido puesta de relieve como sigue:

"Los datos de los ensayos de combustión sólo indican cómo funcionaba la incineradora en el momento en el que se tomaron los datos, normalmente sólo durante unos pocos días. No hay ninguna indicación acerca de cómo respondería la incineradora si variaran las condiciones del combustible o de los residuos. La composición del flujo de residuos varía ampliamente, debiendo quemar una incineradora dada diferentes tipos de sustancias tóxicas a lo largo de su vida útil. Los resultados de una prueba de combustión difícilmente pueden generalizarse para predecir la composición de los humos de una incineradora al producirse las variaciones anteriores." [Staley 1986]

Incinerabilidad de los PCOPs

Como ya dijimos, si una incineradora alcanza una ED de un 99,99 %, durante un ensayo de combustión de uno o más PCOPs, los operarios y responsables de la normativa legal afirman frecuentemente que dicha incineradora alcanzará la misma ED durante la combustión rutinaria de residuos industriales. Para esta suposición se basan en que, en dichos ensayos de combustión, se han escogido los PCOPs más difíciles de destruir de los compuestos químicos que se encontrarían en los residuos que se van a quemar rutinariamente. Los datos experimentales, no obstante, no apoyan esta suposición.

Los PCOPs utilizados para las mediciones de las EDs durante los ensayos de combustión se seleccionan mediante un sistema de clasificación basado en las siguientes características: entalpía de combustión (calor de combustión o energía que se libera al romperse y reorganizarse los enlaces atómicos durante la combustión), estabilidad térmica a concentraciones altas y bajas de oxígeno y temperatura de ignición espontánea. Actualmente existen discrepancias entre estos sistemas de clasificación y en la comunidad científica respecto a su fiabilidad. Por ejemplo, un investigador llegó a la siguiente conclusión:

"Existe un conjunto considerable de pruebas experimentales que indican (...) que las entalpías de combustión no se correlacionan bien con las EDs." [Cook 1989]

El mismo autor ha recogido los datos utilizados en varios sistemas de clasificación para 28 productos considerados normalmente como PCOPs. A fin de ilustrar las diferencias seguidamente se muestra la clasificación de dos productos, tetracloruro de carbono y tricloroetileno, de acuerdo a cada uno de dichos sistemas:

TABLA 1.1
COMPARACION DE LOS SISTEMAS DE CLASIFICACION DE INCINERABILIDAD PARA LOS COMPUESTOS SELECCIONADOS

Parámetro	Tetracloruro de carbono	Tricloroetileno
Entalpía de Combustión	1	7
Temperatura de Ignición	ND	14
Estabilidad Térmica (O ₂ bajo)	13	6
Estabilidad Térmica (O ₂ alto)	8	7
Temperatura de Destrucción del 99 % en 2 segundos	8	7

Fuente: Cook 1989
 ND: No hay datos disponibles

Los científicos han encontrado que la incinerabilidad de los productos varía de forma compleja y difícilmente predecible, dependiendo de la temperatura, oxígeno disponible, velocidad de alimentación y de la composición de residuos:

"Debido a las inevitables interacciones catalíticas e inhibitorias entre las especies, las velocidades de reacción o destrucción de una mezcla de compuestos peligrosos puede diferir notablemente de la velocidad observada cuando existe un sólo compuesto...Es evidente que los criterios de destrucción basados en los datos obtenidos de estudios realizados con un sólo compuesto son insuficientes para estimar la facilidad o dificultad relativa de destrucción térmica de los materiales peligrosos reales. Si existen interacciones inhibitorias, los datos de destrucción de compuestos simples son inadecuados para estimar el comportamiento global del sistema, dado que la destrucción de ciertas especies de la mezcla será menor que la observada en los experimentos con un sólo componente. Para estimar dicho comportamiento, por tanto, son necesarios datos adicionales, aunque la cantidad necesaria de los mismos para describir todas las posibles mezclas es, probablemente, demasiado grande y costosa." [Senkan 1988]

En resumen, no existe una base suficiente para garantizar que las EDs del 99,99 %, alcanzadas durante los ensayos con uno o más PCOPs, se mantengan en condiciones rutinarias de funcionamiento con mezclas complejas de residuos. Además, ciertos PCOPs relativamente fáciles de destruir pueden producir ciertos PICs muy difíciles de incinerar. [Staley 1986]

Acumulación del error

Si consideramos un efecto acumulativo del error, a lo largo de las operaciones realizadas para la determinación de las EDs, podemos obtener unas EDs reales radicalmente distintas de las EDs nominales, debido a las múltiples imprecisiones del método utilizado para su determinación. Actualmente, las EDs se calculan por medio de un proceso en múltiples etapas, y con datos recogidos de numerosas fuentes con técnicas muy diversas.

Existe una imprecisión inherente a cada paso de este proceso, debida a los procedimientos de muestreo y analíticos o al diseño experimental y a las operaciones humanas. Por ejemplo, un estudio de las técnicas de muestreo utilizadas normalmente para recoger gases durante los ensayos de combustión encontró que la exactitud de los dispositivos utilizados para retener los gases durante dichos ensayos podía variar en un +/- 50 % o más. [Jakanty 1989] En otro estudio, los investigadores encontraron que *"las eficiencias de extracción de los PCOPs seleccionados, del tren de muestreo VOST iban del (...) 37,82 % para la metil vinil cetona (...) al 118,1 % para el cloroformo."* [Robb 1986]

Una vez cuantificados los PCOPs capturados en el muestreo, su concentración se multiplica por el caudal total de los gases salientes para calcular la ED final. Los caudales son, también, sumamente imprecisos, de acuerdo a una evaluación realizada en ocho incineradoras de tamaño industrial:

"Incluso las mediciones de los caudales de gas de la chimenea tienen grandes errores que, a su vez, inducen errores en medidas críticas como los tiempos de residencia y las concentraciones de oxígeno... Las mediciones del gas de combustión pueden estar afectadas por corrientes descendentes de aire desde la cámara de combustión... Estas corrientes pueden afectar a los resultados de, al menos, cuatro de las ocho incineradoras. En dichas incineradoras, el caudal de gas calculado iba del 51 al 75 % del caudal medido." [Trenholm 1984]

Dado que cada uno de estos factores se multiplica, la magnitud de la incertidumbre de su medición es, asimismo, multiplicada. La Tabla 1.2 relaciona alguno de los errores conocidos de las mediciones de las EDs. Por ejemplo, para la incineración del cloroformo, un examen de esta lista parcial de errores relativos muestra que una ED nominal del 99,99 % puede ser en realidad tan sólo de un 79 %. [Welch 1986] Los analistas que realizaron esta determinación hicieron la siguiente observación:

"Las EDs pueden no ser el método más apropiado para indicar el correcto funcionamiento de una incineradora. Una afirmación relativa a la eficiencia de un componente del equipo no debe considerarse completa si no va acompañada del margen de error de la medición, junto con el método utilizado para calcular dicho margen de error." [Welch 1986]

Tabla 1.2	
LISTA PARCIAL DE ERRORES CONOCIDOS EN LAS MEDICIONES DE EDs	
Parámetro	Porcentaje de Error
Caudal volumétrico de la mezcla	5,0%
Concentración de PCOPs	4,5%
Peso específico de los PCOPs	0,7%
Densidad del agua	0,2%
Temperatura del gas	3,3%
Presión del gas de combustión	0,3%
Caudal volumétrico del gas de combustión	1,5%
Concentración del PCOP en dicho gas	20,0%

Fuente: Welch 1986

Efecto de Histéresis

Otro fallo importante del método actual de determinación de las EDs ha sido puesto de manifiesto por el descubrimiento de un efecto de histéresis: la retención de PCOPs dentro del sistema de combustión, y su continua aparición en los gases salientes durante prolongados períodos de tiempo después de haber cesado su alimentación en el sistema de combustión. En uno de los primeros casos informados, los científicos comentaron que *"la concentración, en los gases salientes, de ciertos componentes de los residuos continuó durante varias horas después de haberse detenido la incineración"* durante ensayos de combustión de una caldera. [Mason 1988]

Este efecto de histéresis fue corroborado por un estudio posterior. Dos horas después de detener el flujo de tetracloruro de carbono y clorobenceno en una caldera a escala de planta piloto, los investigadores encontraron que dichos PCOPs se encontraban todavía en los gases salientes, en concentraciones que eran de un 121% y un 388 % respectivamente, de las concentraciones de los mismos encontradas en los gases salientes mientras estaba todavía conectada la alimentación de dichos PCOPs. En una serie de 13 experimentos en los que los residuos fueron incinerados con gasolina, y otros 3 en que fueron incinerados con petróleo, "43 horas después (tras cesar la combustión) se emitían todavía aproximadamente un 50 % de las concentraciones medidas inicialmente." No se encontró una relación consistente entre este fenómeno y la temperatura del horno, comprendida entre 1.000 °C - 1.500 °C. [Licis 1989]

La Tabla 1.3 muestra los efectos de la histéresis en la ED, basados en los datos recogidos durante el estudio anterior. Las EDs reales resultan ser dos órdenes de magnitud inferiores que las calculadas a partir de las concentraciones de los PCOPs en los muestreos efectuados mientras continuaba la alimentación de PCOPs en el sistema.

- 1) Relación entre la concentración de las emisiones de histéresis (promedio entre las 0-43 horas tras cesar la combustión) y la concentración durante la combustión de residuos, suponiendo una ED de un 99,99 % para esta última.
- 2) Relación entre la masa total de las emisiones de histéresis, hasta 43 horas después de cesar la combustión, y la masa de las emisiones durante la combustión de residuos.
- 3) ED incluyendo las emisiones de histéresis, suponiendo un 99,99 % a la ED medida durante la combustión de residuos.

Sustancia	Tasa de Histéresis (1)	Factor de Histéresis Total (2)	ED Real (3)
Tetracloruro de Carbono	0,60	77,4	99,23%
Monoclorobenceno	2,40	309,6	96,93%
Tricloroetileno	0,19	24,5	99,75%
Total Comp. Clorados Volátiles	0,74	95,5	99,05%

Fuente: adaptado de Licis 1989

CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INCINERADORA

En las operaciones reales, las incineradoras se desvían del funcionamiento ideal. Estas desviaciones - denominadas perturbaciones de combustión- varían en gravedad y duración, y comprenden desde explosiones y llamaradas hasta breves y pequeñas perturbaciones en ciertas regiones de la incineradora. Se cree que tanto las perturbaciones a gran escala, como las perturbaciones a pequeña escala aumentan las emisiones de PICs y residuos no quemados.

Perturbaciones de combustión a gran escala

Los factores que contribuyen a las perturbaciones de la combustión en gran escala, y las consiguientes emisiones tóxicas elevadas, incluyen fallos del equipo, errores humanos, y cambios bruscos e importantes de la composición de los residuos. Como un estudio de los fallos de las incineradoras puso de relieve *"cualquier proceso industrial (incluyendo la incineración de residuos industriales peligrosos) puede sufrir accidentes u otros acontecimientos no planeados"*. [Holton 1988]

El mismo análisis indicaba los siguientes tipos de eventos que pueden esperarse que originen emisiones por encima de lo normal:

- 1.- Fallos para responder a condiciones de perturbación, tales como fallos en el sistema de control de polución del aire, pérdida del aire de combustión, pérdida de combustible, falta de atomización, falta de llama, etc.
- 2.- Fallo para evitar emisiones durante condiciones de sobrealimentación.
- 3.- Fallos durante el proceso de parada, originando como consecuencia explosiones de combustible, etc.
- 4.- Pérdidas externas de combustible, que originen una explosión externa a la cámara de combustión. [Holton 1988]

Otros factores que contribuyen a la frecuencia y duración de las perturbaciones de la incineradora incluyen variaciones repentinas de la velocidad de alimentación de residuos o en su composición, causando combustiones incompletas y variaciones en las proporciones residuos/oxígeno.

De acuerdo a la USEPA: *"Además de las diferencias en la composición de residuos, las incineradoras pueden tener una distribución de temperaturas irregular, condiciones de mezcla insuficientes, o zonas de bajas temperaturas que originen combustiones incompletas que, a su vez, causen un aumento de la formación de PICs."* [USEPA 1989b]

Estas y otras alteraciones son inherentes al funcionamiento de las incineradoras que trabajan a gran escala, especialmente aquellas que quemen residuos de volatilidad, valor energético y resistencia a la oxidación variables. Además, al igual que todos los equipos con condiciones muy duras de funcionamiento, las incineradoras y dispositivos de control de polución se vuelven menos fiables conforme avanza su vida útil.

La imposibilidad de predecir, y mucho menos de evitar, las perturbaciones en la incineradora se ha descrito como se indica a continuación:

"La complejidad del proceso de incineración, las diferencias de diseño de las incineradoras, y las dificultades para controlar sus condiciones operativas hacen que la predicción exacta del funcionamiento de la incineradora sea una tarea imposible por definición... Una pequeña variación en las condiciones óptimas, en una pequeña parte del volumen de residuos, puede producir una variación significativa de las eficacias de destrucción planificadas." [Dellinger 1986]

Otro investigador observó que *"un diseño, control o utilización inadecuado de tales sistemas (de incineración) puede suponer una amenaza para la salud pública debido a las emisiones de componentes potencialmente peligrosos de los residuos o de productos derivados."* [Oppelt 1986]

Las perturbaciones pueden tener efectos significativos aunque sean cortos e infrecuentes. *"Incluso breves períodos de funcionamiento de incineradores en condiciones de deterioro pueden aumentar considerablemente la carga de productos emitidos al ambiente por la incineradora"*, de acuerdo a la Comisión Consultiva Científica de la USEPA [USEPA 1985a]

Si bien se sabe que la cantidad de PICs emitidos aumenta durante condiciones de perturbación, no está claro cómo puede variar el carácter de dichos PICs en dichas condiciones. De acuerdo a un examen: *"Se han realizado muy pocas pruebas para identificar y cuantificar los PICs procedentes de condiciones la combustión de residuos peligrosos distintas de las ideales."* [USEPA 1989b]. Dicho examen establecía la hipótesis de que, en condiciones de perturbación de la combustión, las emisiones de PICs semivolátiles y no volátiles (que suelen ser más tóxicos que los PICs volátiles) sufren los aumentos más importantes. [USEPA 1989b]

Las emisiones excesivas debidas a perturbaciones en la combustión de residuos tóxicos en incineradoras han sido frecuentes en este tipo de instalaciones. [Petzinger 1985b] Se han documentado, al menos, dos casos de explosiones de incineradoras, sin incluir los casos de explosión de los depósitos de almacenamiento de residuos en dichas instalaciones. [Adkins 1987, Petzinger 1985]

Perturbaciones de combustión a pequeña escala

Incluso si pudieran evitarse las grandes perturbaciones, mediante un perfecto mantenimiento y control para mantener las condiciones de funcionamiento, en el interior de una incineradora tienen lugar continuamente pequeñas variaciones, breves y locales, de dichas condiciones. Estas alteraciones momentáneas de las condiciones ideales pueden disminuir la eficiencia de destrucción y aumentar la emisión tanto de residuos no quemados como de PICs.

Según un análisis, las desviaciones de las condiciones de combustión deseadas son *"normalmente consecuencia de una rápida variación en el funcionamiento de la incineradora debida a una brusca alteración de la velocidad o composición de la alimentación, insuficiente atomización de combustibles líquidos, alteraciones de la temperatura, casos en los que la fracción de mezcla del combustible está fuera del intervalo conveniente, o debido a una mezcla insuficiente entre el combustible y el oxidante... La cantidad y composición de los PICs depende, de forma compleja e impredecible, de la naturaleza de*

la perturbación." [USEPA 1989a]

Estas variaciones en el funcionamiento de la incineradora pueden potenciarse por variaciones en la composición de la alimentación, inherente a las incineradoras reales, especialmente instalaciones industriales o que reciben la alimentación en forma discontinua. La identificación de los factores que originan los PICs en dichas circunstancias *"requiere un análisis, planta por planta, de las numerosas reacciones que ocurren dentro de las complejas mezclas de los residuos alimentados"*. [USEPA 1989b]

Entre dichos fenómenos transitorios están los llamados "puffs", que tienen lugar cuando se introducen residuos volátiles de forma discontinua en la incineradora. Al encontrarse en la incineradora en un entorno a altas temperaturas, dichos residuos se volatilizan rápidamente, provocando una mezcla inadecuada con el aire de combustión y son emitidos antes de que los residuos estén completamente oxidados. [Linak 1987] Según un estudio de los "puffs" en una incineradora de horno rotatorio *"los resultados demuestran la facilidad con que pueden alcanzarse circunstancias de fallo, incluso con exceso de aire y a altas temperaturas del horno. Los análisis indican que los «puffs» originados incluso de residuos inocuos pueden contener numerosos compuestos peligrosos, incluso aunque se alcancen las EDs adecuadas (99,99 %)"*. [Linak 1987]

Incluso si todos los indicadores muestran una temperatura global, turbulencia y disponibilidad de oxígeno óptimas, pueden estar produciéndose pequeñas perturbaciones locales en el horno. La formación de PICs debido a estos fenómenos transitorios *"puede deberse a pequeñas bolsas dentro de la zona de combustión, en las que no existan la temperatura, tiempo de mezcla, y turbulencia necesarios para incinerar completamente los productos de combustión de los PCOPs."* [USEPA 1990] Estas continuas perturbaciones no son fácilmente detectadas, de forma visible o por el equipo de supervisión, a partir de parámetros tales como la temperatura o el nivel de monóxido de carbono.

Una causa de emisiones tóxicas, a pesar de que las condiciones de la incineradora sean óptimas, es el fenómeno de las *"gotas vagabundas"* controlado por procesos físicos más que por la oxidación química. Cuando se pulveriza un residuo líquido en la zona de combustión, algunas pequeñas gotas pueden ser arrastradas por convección a través de la zona de alta temperatura, produciéndose una combustión incompleta. Según un estudio en una incineradora de inyección líquida:

"La combustión incompleta de unas pocas gotitas pueden causar el fallo de la incineradora... la penetración o desviación de unas cuantas gotas por la zona de llama puede resultar en un fallo. Por ejemplo, el paso de una gotita de 300 micrometros de una cantidad total de 10 millones de gotitas de un diámetro medio de 30 micras puede llevar a que la ED sea de menos del 99,99 %, y causa por tanto, el fallo de la incineradora. Las mediciones de la distribución de tamaños de las gotitas, efectuadas en distintos pulverizadores de combustible, muestran que éstas existen y tienen un diámetro comprendido entre 100 y 500 m, lo que es un orden de magnitud superior a la media." [Mulholland 1986]

Todavía no se han determinado los medios para prevenir estos efectos físicos - especialmente para residuos de composición variable.

SUPERVISION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INCINERADORA

La única medición representativa del funcionamiento de una incineradora -desde el punto de vista de la salud pública y el medio ambiente- son las identidades y cantidades de los productos químicos emitidos diariamente al ambiente durante la incineración rutinaria de residuos. No obstante, como ya dijimos anteriormente, no existen métodos que permitan un muestreo continuo y un análisis completo de las emisiones de una incineradora, ya sea en ensayos de combustión o en el funcionamiento rutinario.

Actualmente, los operadores y responsables de la normativa legal intentan realizar este control observando la variación de ciertos 'indicadores substitutorios' y parámetros operativos. Los más frecuentemente utilizados son la temperatura de la incineradora y las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos totales. No obstante, no hay acuerdo en la comunidad científica de que cualquiera de

dichos indicadores refleje suficientemente el funcionamiento de la incineradora:

"No se pueden especificar todavía niveles absolutos de parámetros operativos de los procesos que garanticen por anticipado que una incineradora alcanzará la ED estándar del 99,99 % para un residuo determinado... La supervisión continuada de los niveles absolutos específicos de emisiones de monóxido de carbono, oxígeno y carbono orgánico halogenado totales no garantiza que se esté alcanzando una ED del 99,99 %." [Oppelt 1986]

Los parámetros operativos considerados normalmente indicativos de una buena combustión- alta temperatura y disponibilidad de oxígeno... - han sido asociados con incrementos en las emisiones de PICs y PCOPs para ciertos residuos químicos. [Linak 1987, Staley 1986]. El Comité Científico Asesor de la USEPA llegó a la conclusión de que *"es necesario un mejor conocimiento de la relación entre los parámetros operativos y las emisiones, a fin de seleccionar adecuadamente los parámetros a controlar y establecer sus límites."* [USEPA 1989a]

Monóxido de Carbono e Hidrocarburos Totales (THC)

Las concentraciones de CO y THC en los gases de la chimenea se utilizan frecuentemente como indicadores substitutorios del funcionamiento de la incineradora. El monóxido de carbono, que se puede controlar de forma fácil y barata, se utiliza a veces como indicador global de problemas de combustión, dado que los niveles de CO se supone que aumentan durante condiciones de perturbación importantes. [USEPA 1990]

La correlación teórica entre los niveles de CO y los PIC se basa en dos suposiciones:

- 1.- que la combustión del CO es el paso más lento, de la oxidación de un compuesto orgánico;
 - 2.- que el CO es más estable térmicamente que los otros PICs.
- [USEPA 1990].

Ninguna de estas suposiciones es válida en el entorno complejo de una incineradora real que quema una mezcla de residuos: como ya se indicó, las clasificaciones de la estabilidad térmica de los diferentes compuestos son frecuentemente contradictorias y tienen poca relación con las múltiples reacciones concurrentes que tales sustancias sufren en una incineradora.

La correlación entre los niveles de CO y las emisiones de PICs no encuentra ningún apoyo en los datos experimentales. Además, aunque los niveles elevados de CO indican frecuentemente perturbaciones importantes y niveles elevados de PICs, debe recordarse que dichos PICs se generan asimismo en cantidades variables en condiciones "ideales" de combustión, cuando el nivel de CO es bajo. En un estudio se encontró que los niveles de CO guardaban *"sólo una débil relación con las ED (eficiencia de destrucción) y variaba un poco según el compuesto que se quemara."* [Staley 1986] En una revisión de la base de datos de PICs y CO, la USEPA hizo la siguiente observación:

"Los niveles de CO en el gas no pueden correlacionarse con la ED de los PCOPs, y puede no guardar relación con la destrucción de los PICs... Las pruebas no muestran correlación entre el nivel de CO y la ED, pero sí muestran una débil relación entre dicho nivel y los PICs clorados y una clara relación con los hidrocarburos totales sin quemar." [USEPA 1990]

En esta revisión de todos los datos existentes de niveles de CO y PCOPs, aparece una leve correlación para solo 5 de los 15 PICs estudiados, no pudiendo establecerse una relación con el resto. [USEPA 1990] Otros autores que evaluaron la relación entre niveles de CO y de hidrocarburos totales no encontraron *"ninguna clara correlación"* entre dichos parámetros [Trenholm 1988]

El Comité Científico Consultivo de la USEPA ha revisado la información existente sobre incineradoras, y encontró que:

"La base de datos acerca de los PICs existentes en las emisiones no permite establecer una correlación

entre los niveles de CO y de hidrocarburos totales, para diversos dispositivos y/o condiciones de combustión ... La correlación entre los niveles de CO, THC u otros parámetros con la eficiencia de combustión y las concentraciones de PICs en las emisiones es débil en ciertas condiciones y para ciertos dispositivos de combustión." [USEPA 1989a]

Aunque los hidrocarburos totales son una medida algo más directa de lo que se emite en los gases de la chimenea de una incineradora, guardan poca relación con las cantidades y tipos de PICs emitidos. Según una revisión de los métodos de muestreo de THC:

"Un incremento de 10 ó 100 veces en la concentración de un compuesto orgánico con capacidad de respuesta bajo, pero altamente tóxico, podría pasar desapercibida entre la señal de fondo de hidrocarburos no tóxicos pero de alta capacidad de respuesta. Existen muchas mezclas de compuestos orgánicos clorados y no clorados que podrían originar exactamente la misma respuesta FID [un dispositivo de control de hidrocarburos totales] ... La composición de los compuestos en el gas de la chimenea y por tanto el factor promedio de respuesta variará. Por tanto, incluso en una incineradora sencilla que queme un único residuo no es posible deducir si un cambio en la respuesta FID represente un cambio en la velocidad de emisión o en la composición." [USEPA 1989a]

Además, la capacidad de control de THC, tal y como está desarrollada, puede medir sólo un grupo seleccionado de compuestos. Los PICs semivolátiles y no volátiles -que en general son más tóxicos que los volátiles- no están incluidos en las mediciones de THC. [USEPA 1989b] Como resultado, un aumento de estos PICs más tóxicos puede no ser reflejado en las lecturas de hidrocarburos totales. Además los PICs clorados -también un tipo de PIC generalmente más tóxico- tampoco pueden medirse fácilmente con los métodos actuales. En efecto, cuanto más alta la concentración de PICs clorados, menor es la medición de hidrocarburos totales, dado que "cada átomo de cloro provoca una reducción de la respuesta de 0,12 unidades", de acuerdo a un estudio de los sistemas de medición de hidrocarburos totales. [USEPA 1989a]

Temperatura

La temperatura parece ser la variable con mayor influencia en la ED. A temperaturas demasiado bajas para una combustión efectiva, una parte de los residuos químicos escapará inalterada. Las temperaturas bajas pueden, asimismo, favorecer la formación de PICs.

Por otro lado, las temperaturas elevadas no son garantía de una combustión completa. Como ya indicamos, las incineradoras que parecen operar en condiciones de combustión ideales contienen siempre bolsas localizadas con importantes variaciones de temperatura y otras condiciones, que producen emisiones tóxicas. [USEPA 1990]

Existen, además, pruebas importantes que indican que los PICs se forman después de la combustión, una vez que los productos han salido del horno y entran en las partes más frías, como la chimenea, los dispositivos de control de polución o incluso en el aire en el exterior. Un estudio de una incineradora indicó que:

"Es muy probable que se formen cantidades muy pequeñas de dichas sustancias [un grupo de PICs, incluyendo dioxinas] al enfriarse los gases de combustión si la composición del sistema corresponde a aquellas. Puede también especularse con la posibilidad de que las especies más sencillas químicamente se formen, en concentraciones detectables, más fácilmente que sustancias que requieran una serie más larga de reacciones intermedias." [Chang 1987]

En estas zonas más frías de la incineradora, las reacciones de formación de los PIC parecen dominar sobre las reacciones de combustión deseadas existentes en el interior del horno. Según otro estudio:

"Una vez en la zona fría, la temperatura puede ser lo suficientemente baja para hacer que las reacciones radical- molécula con los productos de combustión finales estables, presentes ahora en gran concentración, p. ej. CO₂, H₂O, y ClH tengan lugar a menor velocidad. Como resultado, las reacciones de recombinación radical-radical pueden ser cinéticamente más significativas ... Una vez formadas, a estas moléculas no les afectan las temperaturas elevadas y pueden salir de la incineradora inalteradas."

[Dellinger 1989]

La formación de dioxinas y furanos se ha demostrado que ocurre en la ceniza volante en los dispositivos de control de polución, mucho después de que los gases hayan abandonado las altas temperaturas del horno. En su propuesta de normativa para incineradoras de residuos peligrosos la USEPA propone lo siguiente:

"Los datos de laboratorio han mostrado específicamente aumentos en las concentraciones de CDD(dibenzodioxinas cloradas)/CDF(dibenzofuranos clorados) en la ceniza volante expuesta a los gases de combustión en el intervalo de temperaturas de 250 °C a 350 °C, y las pruebas "reales" han mostrado aumentos en dichas concentraciones en todas las calderas y ESPs (precipitadores electrostáticos) a altas temperaturas. Ello sugiere que una destrucción incompleta del material orgánico en la zona de combustión y su absorción en la ceniza arrastrada por el aire aumenta significativamente la posibilidad de formación de CDD/CDF en superficies posteriores que tengan una temperatura entre 250 °C y 350 °C". (USEPA 1989b).

En varios estudios de incineradoras municipales de residuos, sólo una fracción - del 1% al 11% del PCDD encontrados a las salidas de los dispositivos de control de polución - estaban presentes cuando los gases salían de la cámara de combustión. (Hagenneier 1987; y Commoner 1987). Un autor escribió: *"Debido a que estas reacciones tienen lugar en las zonas más frías de la incineradora, que se encuentran a continuación del horno, los PCDD/PCDF no son afectados por las temperaturas existentes en el horno de la incineradora."* [Commoner 1987]

Por otra parte, el aumento de temperaturas de la incineradora puede crear más problemas de los que resuelve. Las temperaturas elevadas favorecen la aparición de "puffs", en los que los residuos se volatilizan demasiado rápidamente y salen sin quemar. Según otro autor *"el aumento de la temperatura y velocidad de rotación de los hornos puede contribuir a la aparición de "puffs", debido al aumento de volatilización y las velocidades de evaporación de los líquidos."* [Linak 1987] Como se indicará en el capítulo 4, las temperaturas elevadas pueden favorecer también la emisión de metales pesados.

En pruebas reales, realizadas en incineradoras en funcionamiento, las altas temperaturas no han evitado la formación y emisión de PICs. Un estudio de la USEPA sobre los datos de emisiones tóxicas de incineradores de residuos ha puesto de manifiesto que los 15 PICs más frecuentes se emiten de *"incineradoras, calderas, y hornos rotatorios, en un amplio intervalo de condiciones. Por ejemplo, la temperatura variaba de 700 °C a 1500 °C, los tiempos de residencia de 0,2 a 6 segundos y las concentraciones de oxígeno del 2 % al 15%."* [Trenholm 1986]

Disponibilidad de oxígeno

Las incineradoras deben facilitar asimismo un aporte adecuado de oxígeno para permitir que se produzcan las reacciones de oxidación. No obstante al igual que en el caso de las temperaturas, los intentos para aportar la concentración de oxígeno adecuada pueden crear nuevos problemas y aumentar las emisiones tóxicas.

Dos estudios de suministro de oxígeno en incineradoras de residuos peligrosos, en condiciones relativamente constantes de temperatura y alimentación, han encontrado que un aumento del nivel de oxígeno producía una disminución de la ED y un aumento de las emisiones de PICs. Aunque la incineradora requiere una cierta cantidad mínima de oxígeno disponible (aproximadamente un 130% de la cantidad estequiométricamente necesaria) la adición de más oxígeno produce perturbaciones de la combustión. [Staley 1985, Staley 1986]. De acuerdo a uno de dichos estudios:

"Los niveles de PCOPs emitidos con niveles excesivos de aire no difieren significativamente de los emitidos cuando la llama se extingue. Tampoco diferían los tipos de PICs. Esto podía ser grave. Cuando la llama se apaga, se produce normalmente un aumento momentáneo de hollín y emisiones de gas cargado con PICs. Con niveles de exceso de aire, la llama puede ser completamente estable, de este modo, bajo condiciones de exceso de aire, pueden emitirse grandes volúmenes de PCOPs y PICs durante

largos periodos de tiempo, resultando un problema de contaminación del aire peor que un apagón momentáneo de la llama." [Staley 1985].

Se cree que en estos casos, un aumento del suministro de oxígeno produce una rápida disminución de temperatura en ciertas partes del horno lo que produce a su vez un aumento significativo de las emisiones tóxicas.

2.- EMISION DE RESIDUOS NO QUEMADOS

Los componentes de los residuos no quemados escapan al medio ambiente, no sólo a partir de los humos de la incineradora, sino también durante el transporte, almacenamiento y manejo.

Emisiones a la atmósfera de residuos no quemados

Muchas incineradoras de residuos peligrosos queman grandes cantidades de los mismos. Por ejemplo, incineradoras comerciales en los Estados Unidos están quemando una media de 306.000 toneladas al año de residuos peligrosos. [Gruber 1990] Incluso si todas estas incineradoras funcionaran con una ED del 99,99% durante cada minuto de funcionamiento, sus emisiones de residuos al aire totalizarían al menos 30 toneladas al año.

Las capacidades individuales de las nuevas incineradoras propuestas en los Estados Unidos pueden ser de hasta 90.000 toneladas al año [Gruber 1990]. Incluso en perfectas condiciones de funcionamiento una incineradora así emitiría unas 9 toneladas de residuos no quemados al aire. En las mismas condiciones ideales, una incineradora de tamaño medio, de unas 31.500 toneladas al año, emitiría al aire unas 3,1 toneladas de dichos residuos.

Si tuvieran lugar efectos de histéresis (ver Capítulo 1), pero no fueran tenidos en cuenta durante la determinación de las EDs de dichas incineradoras, las EDs calculadas del 99,99% pueden ser en realidad sólo de un 99,9 ó 99%. En tal caso las emisiones totales al aire de residuos de las incineradoras de los Estados Unidos pueden ir de las 306 (99,9%) a las 3.060 (99%) toneladas al año. En las mismas circunstancias, las emisiones de una incineradora de tamaño medio estarán comprendidas entre 31 y 310 toneladas anuales.

Además si consideramos un efecto acumulativo del error (ver capítulo 1), las emisiones al aire de residuos no quemados pueden ser considerablemente superiores. Por ejemplo una incineradora de tamaño medio con una capacidad de 31.500 toneladas al año y con una ED nominal del 99,99%, podría tener una ED real de sólo un 79% y emitir al aire más de 6.600 toneladas de residuos al año.

Además estas emisiones de residuos no quemados, que pueden esperarse en condiciones de funcionamiento ideales, aumentarán durante perturbaciones de la combustión (ver capítulo 1).

DEPOSICION EN LOS RESIDUOS DE LA INCINERADORA

Las incineradoras no sólo queman sino que también generan residuos: ceniza de fondo, ceniza volante capturada por los dispositivos de control de polución (PCDs), y efluentes procedentes de filtros húmedos y/o procesos de apagado. Cuanto mayor sea la eficiencia de los PCDs para eliminar contaminante de los gases, mayor será la cantidad de residuos generada.

Una vez recogidos, esta segunda generación de residuos debe eliminarse. Las cenizas son frecuentemente enterradas, pudiendo los contaminantes disolverse y filtrarse a las aguas subterráneas; y los efluentes normalmente se tratan y se vierten en ríos o lagos.

Cuando se quema un residuo líquido, hasta un 9% del volumen original permanece en forma de ceniza. Si se queman residuos sólidos peligrosos, hasta un 29% queda en forma de cenizas. [Trenholm 1984]. Suponiendo una generación mínima de cenizas de un 9%, para residuos líquidos, una incineradora de tamaño medio que queme 31.500 toneladas al año genera 2.835 toneladas de cenizas en dicho período de tiempo. Esta ceniza transporta asimismo, en cantidades variables, muchos de los contaminantes emitidos en los gases de combustión.

Como se describe en el capítulo 3, ciertos estudios han identificado hasta 43 compuestos orgánicos semivolátiles en las cenizas de las incineradoras y al menos 16 compuestos orgánicos en las aguas de los sistemas de filtrado de dichas incineradoras. No obstante, no es posible identificar si dichos productos

son residuos no quemados o PICs producidos por la incineración. En la mayoría de los estudios estos contaminantes se consideran normalmente PICs.

DEPOSICION EN LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE POLUCION (PCD)

Se estima que algunos sistemas de control de polución capturan más del 90% de los contaminantes presentes en los gases de combustión. Los más efectivos tienen una eficiencia de reducción del 99% [USEPA 1990].

Si un PCD captura el 90% de residuos no quemados de las emisiones al aire de una incineradora, la cantidad de residuos no quemados capturados por ese PCD será 9 veces superior a la cantidad que escapa al aire. Basándonos en esta proporción, los residuos de los PCD deberán contener el 0,09% de los residuos alimentados a una incineradora que opere con una ED del 99,99%.

Por ejemplo, una incineradora de tamaño medio que queme 31.500 toneladas al año con una ED del 99,99% y una eficiencia de los PCD del 90%, los residuos almacenados en dichos PCDs contendrán aproximadamente 28 toneladas de residuos no quemados al año. Si tenemos en cuenta el efecto de histéresis, descrito en el Capítulo 1, la ED real puede ser de órdenes de magnitud inferior y la cantidad total de residuos acumulados puede ir de 280 a 2.800 toneladas al año. Si consideramos además el efecto acumulativo del error estas cantidades pueden ser muy superiores.

EMISIONES FUGITIVAS

Las emisiones fugitivas son componentes de los residuos liberados accidentalmente durante el almacenamiento y transporte de los mismos. El Comité Científico Asesor de la USEPA ha hecho la siguiente advertencia:

"Las emisiones fugitivas y vertidos accidentales pueden liberar tanto o más material tóxico al entorno como las emisiones directas de incineraciones incompletas de residuos.... Existe un riesgo potencial de exposición, del ambiente y los seres humanos, al extraerse estos productos de sus contenedores en el emplazamiento de origen, llevarse a los vehículos de transporte, trasladarse a la planta incineradora, y desplazarse dentro de la misma." [USEPA 1985].

En una gran incineradora comercial que quemaba residuos de pesticidas las emisiones fugaces brutas fueron estimadas en 4,5 toneladas al año. El 93% del cloroformo y el 62% del tolueno existente en el aire en esta incineradora fueron identificados como emisiones fugitivas. [Travis 1984].

En un horno de cemento que quemaba unas 4,32 toneladas de residuos a la hora, las emisiones fugitivas fueron estimadas en unas 16,2 toneladas al año. [Systech 1987]. Dado que las emisiones fugaces no pueden preverse y se producen en múltiples lugares en una instalación grande, es muy difícil, si no imposible, realizar una cuantificación precisa.

Las emisiones catastróficas debidas a fuegos y explosiones suponen asimismo un riesgo para las comunidades vecinas. Las incineradoras de residuos de los Estados Unidos han sufrido en ocasiones circunstancias de este tipo [Petzinger 1985]. Las instalaciones comerciales de incineración pueden frecuentemente almacenar varios millones de kilos de residuos [Stein 1990]. Según el Comité Científico Asesor de la USEPA:

"Los accidentes catastróficos, especialmente los ocurridos cerca de incineradoras en los que se almacenan grandes cantidades de residuos líquidos, requieren la capacidad de imponer rápidamente medidas de emergencia (...) Normalmente un plan de emergencia debe considerar la posibilidad de vertidos químicos, fuegos, explosiones, dispersión y exposición atmosférica de productos químicos, y la incidencia de envenenamientos o daños. Estos planes deben considerar asimismo planes de evacuación de la población." [USEPA 1985].

PERDIDAS DURANTE EL TRANSPORTE DE RESIDUOS

Los residuos pueden emitirse al ambiente durante el transporte a la planta incineradora, o a las instalaciones de tratamiento. Una incineradora de tamaño medio que queme 31.500 toneladas de residuos al año recibe más de 1.500 camiones o contenedores de residuos anualmente, o bien más de 28 camiones por semana. Según el Comité Científico Asesor de la USEPA:

"Cuanto mayor es el tráfico entre un generador de residuos y la incineradora, mayor es la posibilidad de vertidos (...) La probabilidad de exposición (...) está influenciada por la cantidad anual total de material incinerado en la región y la capacidad de los vehículos de transporte." [USEPA 1985].

La Oficina de Evaluación Tecnológica de los Estados Unidos ha notificado más de 78.000 incidentes acompañados de la emisión de materiales peligrosos, durante el transporte en los años 1976- 1984. [OTA 1986]. En un testimonio presentado en un comité del Congreso de los Estados Unidos, un funcionario de Nueva Jersey declaró que la policía de dicho estado inspeccionó 8.700 camiones que transportaban residuos peligrosos en 1987. De dicho número, cerca del 36% fueron retirados inmediatamente de servicio, no permitiéndoseles abandonar el lugar de inspección sin proceder previamente a la reparación o corrección de las irregularidades. [Long 1989].

Un análisis de probabilidades para un gran horno de cemento que queme residuos peligrosos muestra que, cada 5 años, es probable que ocurra una importante emisión de productos tóxicos debido a un accidente con un contenedor. [Murphy 1984]. Los impactos ambientales y sobre la salud correspondientes a las emisiones producidas durante el transporte pueden ser significativos.

3.- PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA (PICs)

"Un PIC es un compuesto que no se ha identificado en el análisis de la alimentación de la incineradora, pero que aparece en el gas de salida del mismo." [Tessitore 1990].

Los PICs se forman en las incineradoras, tanto en condiciones de funcionamiento normales como durante las perturbaciones. Una vez formados se distribuyen entre los gases de la chimenea de la incineradora, ceniza del fondo, ceniza volante y efluentes de los dispositivos de control de polución (PCDs).

Los PICs pueden clasificarse, según sus orígenes, en tres categorías:

- 1.- Compuestos producidos por la combustión de los residuos originales. Son la categoría más importante de los PICs.
- 2.- Compuestos procedentes de fuentes distintas de los residuos (por ejemplo, del aire de combustión o combustible auxiliar). Forman una porción pequeña de los PICs.
- 3.- Compuestos presentes en los residuos pero no identificados. Son un pequeño porcentaje de los PICs observados.
[Oppelt 1986; Tessitore 1990].

La primera y más importante categoría de PICs contiene especies que son "*más difíciles de destruir y (...) más tóxicas que los compuestos originarios.*" [USEPA 1985]. Estos productos derivados de la combustión, formados dentro de la incineradora, pueden agruparse según su mecanismo de formación:

- 1.- Fragmentos identificables de los compuestos originales, resultantes de su oxidación parcial o reacciones de sustitución sencillas. Un ejemplo es la aparición de hexaclorobenceno como un producto derivado de la combustión de PCB.
- 2.- Productos de reacción resultantes de reacciones de recombinación o sustitución complejas. Incluye compuestos de alto peso molecular resultantes de reacciones complejas, como naftaleno, fluorantano, y pireno.
- 3.- Fragmentos sencillos que aparecen como productos universales de la combustión de compuestos orgánicos. Esta categoría incluye muchos compuestos de bajo peso molecular como metanos, etanos y etilenos clorados. Algunos de los compuestos más frecuentemente detectados son cloroformo, tetracloruro de carbono, tricloroetileno, tetracloroetileno, benceno, fenol, tolueno y clorobenceno.
[Tessitore 1990].

CANTIDAD DE PICs EN LAS EMISIONES A LA ATMOSFERA

Al igual que las EDs, las emisiones de PICs al aire dependen, cualitativa y cuantitativamente, de la temperatura, tiempo de retención, disponibilidad de oxígeno, y grado de mezcla/turbulencia. [Tessitore 1990]. En un examen realizado en los Estados Unidos, las emisiones de PICs han resultado ser muy variables según la incineradora. Estas variaciones se atribuyen en parte a diferencias en la composición y velocidad de las correspondientes alimentaciones de residuos. [USEPA 1989b].

En general, las tasas de PICs aumentan al aumentar la velocidad de alimentación de residuos. [Dellinger 1988]. Los PICs han resultado ser "*más numerosos, complejos y difíciles de destruir*" al disminuir la concentración de oxígeno y aumentar la concentración de cloro. [USEPA 1989b]. Por ejemplo, en un estudio se producían cantidades significativas de tricloroetileno, tetracloroetileno y dicloroacetileno, cualquiera que fuera el nivel de cloruros de la alimentación. Con altos niveles de cloruros, los PICs formados incluían algunos PICs más tóxicos y bioacumulativos, como 1,3-hexaclorobutadieno y hexaclorobenceno y octacloroestireno. [USEPA 1989b].

En ensayos de incineración en laboratorios, la proporción de PICs identificados con respecto a los PCOPs de las emisiones al aire puede variar de 0,5 a 7 [Tessitore 1990], dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Para calderas este cociente está comprendido entre 7 y 15. [Mason 1988, Castaldini 1986]. Estas relaciones se calculan utilizando solamente los PICs identificados con seguridad, no incluyéndose los

contaminantes de identidad desconocida. Basándonos en el hecho de que los análisis de las emisiones disponibles han identificado del 1% al 60% de los PICs totales existentes, el cociente de PICs totales respecto a PCOPs puede oscilar entre 0,83 y 700.

Según estas proporciones, si una incineradora pudiera alcanzar una ED del 99,99% continuamente para todos los residuos, las emisiones de PCOPs no quemados serían de un 0,01% y las emisiones de PICs oscilarían entre 0,005% y 0,07% de la masa de residuos quemados. Para una incineradora de tamaño medio con una capacidad de 31.500 toneladas al año las emisiones al aire de PICs identificados irían de 1,75 a 22 toneladas al año, y una emisión conjunta de PICs identificados y PCOPs no quemados comprendida entre 4,7 y 25 toneladas al año. Considerando las tasas mucho más altas para PICs no identificados, como para PICs no caracterizados, el total de emisiones de PICs anuales oscilaría entre 2,6 y 2.200 toneladas al año para esa incineradora.

Considerando el vacío existente entre las cantidades de PICs identificados y el total de PICs realmente existentes en las emisiones de la incineradora, un estudio exhaustivo del Comité Científico Asesor de la USEPA hizo la siguiente estimación de emisiones incluyendo PICs y PCOPs no quemados:

"Es evidente que, incluso considerando las incertidumbres intrínsecas a la eficiencia del muestreo y al análisis químico, hasta un 1% de la masa total de residuos alimentada podría salir de la incineradora como compuestos distintos de CO₂, H₂O, CO y CIH." [USEPA 1985].

Según esta última estimación, una incineradora de tamaño medio que procesara 31.500 toneladas al año, podría emitir al aire 315 toneladas de PICs y PCOPs no quemados.

IDENTIFICACION DE LOS PICs PRESENTES EN LAS EMISIONES ATMOSFERICAS

Se estima que las incineradoras de residuos peligrosos producen y emiten varios miles de PICs diferentes. [USEPA 1990]. Sin embargo, menos del 70% de éstos han sido identificados químicamente, incluso en los sistemas de combustión ensayados en el laboratorio. Normalmente, en estos ensayos, sólo se identifican entre el 1% y el 60% de la masa total de hidrocarburos no quemados, tanto PICs como PCOPs, presentes en los gases emitidos por la chimenea de las incineradoras industriales. [USEPA 1989b].

Se cree que ciertos compuestos, como el fosgeno y el formaldehído, se encuentran a menudo presentes entre los productos de combustión incompleta. Sin embargo, *"no se cuantifican normalmente en los ensayos de combustión debido a que requieren métodos adicionales de muestreo y análisis."* [USEPA 1989b]. Además, en los Estados Unidos se ha establecido como regla generalmente aceptada el limitar la identificación de PICs durante los ensayos de combustión únicamente a aquellos productos incluidos en la lista del "Apéndice VIII" de la USEPA, que incluye unos 300 compuestos químicos peligrosos.

En un estudio, se encontró que la cantidad de PICs volátiles no incluidos en dicho apéndice variaba desde una pequeña porción hasta el doble de la cantidad de PICs que aparecían en dicha lista. Para los PICs semivolátiles, la cantidad no relacionada en el "Apéndice VIII" era entre 3 y 30 veces la cantidad de compuestos relacionados. [Trenholm 1986].

Un estudio de los datos de ensayos de combustión encontró que por la chimenea se emitían 55 compuestos incluidos en el "Apéndice VIII", de los cuales 28 eran volátiles y 27 semivolátiles. Los compuestos que se detectaban más frecuentemente, y a las concentraciones más altas, incluían los 9 PICs volátiles y 6 PICs semivolátiles que aparecen en la Tabla 3.1 [Trenholm 1986].

Tabla 3.1
**PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA* IDENTIFICADOS CON MAS FRECUENCIA EN LAS EMISIONES
 ATMOSFERICAS DE LAS INCINERADORAS**

Compuestos Volátiles	Compuestos Semivolátiles
Benceno	Naftaleno
Tolueno	Fenol
Tetracloruro de carbono	Bis (2-etilhexil) ftalato
Cloruro de metileno	Dietilftalato
Tricloroetileno	Butilbenzilftalato
Tetracloroetileno	Dibutilftalato
1,1,1-Tricloroetano	
Clorobenceno	
Cloroformo	

Fuente: Trenholm 1986

(*) Solamente compuestos incluidos en el Apéndice VIII

La Tabla 3.2 contiene una lista más completa de los productos identificados en los humos emitidos por las chimeneas de incineradoras de residuos.

Dado que casi todos los PICs son identificados y medidos en condiciones de funcionamiento rigurosamente controladas, existe poca información referente a la emisión de PICs en condiciones de perturbación de combustión:

"Se han realizado muy pocos ensayos para identificar y cuantificar los PICs de incineradoras de residuos peligrosos en condiciones distintas de las ideales... La mayoría de los estudios en incineradoras reales se han concentrado en la generación de PICs sólo en condiciones de funcionamiento en las que tenía lugar una buena destrucción de los PCOPs. No existen datos suficientes para saber con certeza si los tipos y concentraciones de los PICs (en condiciones de perturbación) son similares a los tipos y concentraciones de PICs en la base de datos actual." [USEPA 1989b].

Tabla 3.2
PRODUCTOS DE COMBUSTION INCOMPLETA DE INCINERADORAS DE RESIDUOS PELIGROSOS

Acetona (1,3)	Acido etilbenzoico (1)
Acetonitrilo (5)	Etilfenol (1)
Benzaldehido (19)	(Etilfenil)etanona (1)
Benceno (1,3,4,5)	Etilbenceno (1)
Bencenodicarboxaldehido (1)	Formaldehido (5)
Benzofurano (4)	Freón 113 (4)
Acido benzoico (1)	Heptano (4)
Bis(2-etilhexil)ftalato (1,5)	Hexaclorobenceno (2,5)
1-Bromodecano (4)	Hexaclorobutadieno (2)
Bromofluorbenceno (4)	Hexanal (4)
Bromoformo (3)	1-Hexeno (4)
Bromoetano (5)	Metano (3)
Butilencil ftalato (1)	Bromuro de metilo (3)
C8H18 (3)	Metilciclohexano (4)
Tetracloruro de Carbono (1,2,3,4,5)	Metil etil cetona (5)
Clorobenceno (1,3,4)	3-Metilenheptano (4)
1-Clorobutano (4)	3-Metilhexano (4)
Clorociclohexanol (1)	2-Metil hexano (4)
1-Clorodecano (4)	5,7-Metilundecano (4)
Clorodibromoetano (3)	Nonano (4)
2-Cloroetil vinil éter (3)	Nonanol (4)
Cloroformo (1,2,3,4,5)	4-Octeno (4)

1-Clorohexano (4)	Pentaclorofenol (5)
Clorometano (3,5)	Fenol (5)
1-Clorononano (4)	Bifenilos policlorados (PCBs) (2)
1-Cloropentano (4)	Dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDDs) (2,5,6)
Ciclohexano (1)	Dibenzofuranos policlorados (PCDFs) (2,5,6)
Ciclohexanol (1)	Pentalal (4)
Ciclohexeno (1)	Fenol (1,5)
1-Decano (4)	Naftaleno (1)
Dibutilftalato (1)	1,1- (1,4-Phenilene bisethnone)(1)
Dicloroacetileno (2)	Fenilbutanona (1)
Diclorobromometano (3)	Fenilacetileno (1)
1,2-Diclorobenceno (4,5)	Propenilmetilbenceno (1)
1,4-Diclorobenceno (4,5)	1,1,2,2-Tetracloroetano (4,5)
1,1-Dicloroetano (5)	Tetracloroetileno (1,2,3,4,5)
1,2-Dicloroetano (3,4,5)	Tetradecano (4)
1,1-Dicloroetileno (3,5)	Tetrametiloxirano (1)
Diclorodifluormetano (5)	Tolueno (1,3,4,5)
Diclorometano (1,3,4,5)	1,2,4-Triclorobenceno (4,5)
2,4-Diclorofenol (5)	1,1,1-Tricloroetano (1,3,5)
Dietilftalato (1)	1,1,2-Tricloroetano (5)
Dimetil éter (3)	Tricloroetileno (1,2,4,5)
3,7-Dimetilocnanol (4)	Triclorofluorometano (3)
Diocil adipato (1)	2,3,6-Trimetildecano ((4)
Eteniletilbenceno (1)	Trimetilhexano (1)
Etilbenzaldehido (1)	2,3,5-Triclorofenol (5)
Etilbenceno (1,3)	Cloruro de vinilo (3,5)

(1) Trenholm 1986 (ocho incineradoras de escala industrial)
(2) Dellinger 1988 (reactor de llamas en régimen turbulento)
(3) Trenholm 1987 (incineradora rotatoria de escala industrial)
(4) Chang 1988 (reactor de llamas en régimen turbulento)
(5) USEPA "base de datos de PCI", 1989 -revisión datos disponibles
(6) USEPA 1987c (2 incineradoras rotatorias de escala industrial)

Fuente: Boegel 1987)

Es evidente que los tipos y cantidades de PICs emitidos varían durante grandes perturbaciones de combustión. En estos casos, la cantidad total de PICs parece entonces aumentar [USEPA 1985], particularmente los compuestos semivolátiles. [USEPA 1989a]. Los PICs semivolátiles se cree que son normalmente más tóxicos que los volátiles [USEPA 1989a].

PICs EN LAS CENIZAS

En un estudio de las cenizas de las incineradoras se han identificado 37 PICs, algunos de ellos compuestos clorados. Las concentraciones de dichos PICs en la ceniza variaban entre 0,1 a 500 partes por millón (ppm). [Van Buren 1985].

En otro estudio posterior de las cenizas volantes producidas por incineradoras de hornos rotatorios, fijos y de lecho fluido, los investigadores identificaron 43 PICs en concentraciones comprendidas entre 10 y 120 ppm. Los PICs semivolátiles se encontraban en una concentración total de aproximadamente 100 ppm, tanto en las cenizas volantes como en las de fondo. Durante una prueba de extracción ácido/agua, concebida para imitar las condiciones existentes en un depósito de seguridad, las concentraciones de ciertos PICs en las filtraciones de las cenizas resultaron ser superiores a 1 ppm. [Van Buren 1987].

Un estudio de las cenizas producidas por una incineradora de residuos peligrosos que quemaba una mezcla de residuos de disolventes, con un contenido de cloro del 28%, detectó la presencia de 25 PICs cuyas concentraciones individuales iban de 12 a 1.200 partes por billón (ppb). La cantidad total de PICs identificados en las cenizas resultó ser superior al 0,23%. No se contabilizaron aquellos PICs presentes

cuya identificación no se realizó [Boegel 1987].

La producción de ceniza por las incineradoras varía entre el 9% y el 29% de la masa total de residuos quemados [Trenholm 1984]. Según esto, una incineradora de capacidad media (31.700 toneladas/año) produce aproximadamente entre 2.850 y 9.190 toneladas de cenizas anualmente. Si la concentración de PICs se aproxima a la detectada en los estudios anteriores, dichas cenizas han de contener entre 6,3 y 21 toneladas de PICs.

La tabla 3.3 relaciona algunos de los PICs (y posiblemente PCOPs) identificados en las cenizas de la incineradora, así como sus concentraciones.

PICs EN AGUAS RESIDUALES

En algunas incineradoras de residuos peligrosos se utiliza el agua, mayormente para lavados en los dispositivos de control de contaminación, y también en menor medida para apagar las cenizas de incineración. En ciertos casos el agua utilizada es posteriormente tratada y vertida. En otros casos el agua realimenta a la incineradora.

Parámetro	Concentración (ppb)
Acetona	20.000
Benceno	42
2-Butanona	2.000
Clorobenceno	27
Cloroformo	46
1,2-Dicloropropano	32
Dietil ftalato	120.000
2,4-Dimetil fenol	23.000
Dimetil ftalato	55.000
Di-n-butil ftalato	160.000
Etilbenceno	380
Metanol	410.000
Cloruro de metileno	38.000
4-metil-2-pentanona	2.300
Naftaleno	24.000
2-Nitroanilina	180.000
Nitrobenceno	29.000
Fenol	40.000
Estireno	320
Tetracloroetileno	1.200.000
Tolueno	2.500
1,1,1-Tricloroetano	12
Tricloroetileno	120
Xilenos	1.900
Total	2.308.679

Fuente: Boegel 1987

En las aguas de lavado, se han identificado concentraciones significativas de productos y grupos de productos que pueden incluir PICs y PCOPs, según indica la Tabla 3.4. Durante el tratamiento de estos efluentes, parte de estos contaminantes se concentran en los sedimentos. [Boegel 1987].

Existe poca información referente a los productos presentes en el agua de apagado de cenizas de las

incineradoras. En un estudio de una incineradora, que quemaba residuos compuestos casi exclusivamente de cloruro de benceno, con algo de cloruro de bencilo y triclorobenceno, y una porción mínima de otros tres compuestos organoclorados sencillos, los contaminantes encontrados en las muestras de agua de apagado de cenizas incluían rastros de metales, así como los siguientes productos [Turner 1988]:

Contaminante	Concentración (ppb)
Cloruro de benceno	6-94
Tricloruro de benceno	16
Tolueno	15-59
Antraceno	14-210
2,4-Dinitrofenol	15-44
Fenantreno	17-110
Fenol	12-21

Tabla 3.4
CONTAMINANTES IDENTIFICADOS EN LOS EFLUENTES DE LAVADO DE INCINERADORAS DE RESIDUOS PELIGROSOS

Contaminante	Aguas de Lavado (g/l)	
Acetona	32	(1)
Cloruro de metileno	5	(1)
Naftaleno	20	(1)
Acido benzoico	260	(2)
Bis (2-etilhexil) ftalato	32	(2)
Cloroformo	4.100	(2)
Clorometano	2.500	(2)
1,2-Dicloroetano	32.000	(2)
Dietil ftalato	30	(2)
Di-n-butil ftalato	22	(2)
Fenol	100	(2)
Tetracloroetano	5.200	(2)
Tolueno	5.000	(2)
1,1,1-Tricloroetano	6.800	(2)
Tricloroetano	14.000	(2)
Xilenos totales	1.200	(2)
Dioxinas y furanos(total)	43	(3)

(1) Boegel 1987

(2) Van Buren, 1987

(3) USEPA 1987c

PICs MAS PELIGROSOS: DIOXINAS Y OTROS HALUROS DE CARBONO

Entre los PICs más peligrosos se encuentran los haluros de carbono, compuestos que contienen al menos un átomo de carbono enlazado a uno o más átomos de halógenos (cloro, flúor, bromo, yodo o astato). Este grupo de productos, muchos de los cuales son sumamente tóxicos, persistentes y bioacumulativos, incluye algunas de las sustancias más destructivas, ecológicamente hablando: bifenilos policlorados (PCBs), productos clorofluorocarbonados (CFCs), DDT, hexaclorobenceno, dioxinas policloradas (PCDDs), furanos policlorados (PCDFs), mirex, clordano y heptacloro.

La toxicidad de las emisiones de haluros de carbono y su comportamiento en el medio ambiente se describen más adelante en el Capítulo 5.

Los haluros de carbono pueden formarse durante la incineración de sustancias que contengan el elemento carbono y uno o más halógenos. Por lo tanto, los haluros de carbono son PICs frecuentemente emitidos durante la incineración de residuos. En los Estados Unidos, el 46% de los residuos quemados actualmente contiene halógenos, con un contenido medio de los mismos de un 33,2% [Oppelt 1986]. Dado que los compuestos organoclorados constituyen aproximadamente el 95% de las sustancias halogenadas que se producen en los Estados Unidos, la inmensa mayoría de dichos residuos halogenados pueden considerarse como compuestos clorados. [USITC 1987].

De los aproximadamente 100 PICs identificados en la literatura científica sobre incineradoras de residuos peligrosos actualmente en funcionamiento, (que aparecen en la Tabla X), 46 son haluros de carbono (contando ciertas clases de PICs, como las dioxinas cloradas, solamente una vez). En las pruebas de laboratorio, en las que es posible realizar un muestreo y análisis más exhaustivo, han podido detectarse durante la combustión de residuos clorados más de 100 haluros de carbono identificados, que van desde los metanos clorados hasta las dioxinas cloradas. [Eklund 1988]. Un estudio británico hace el siguiente resumen:

"Sucesivas pruebas han demostrado que todas las incineradoras de residuos, independientemente del tipo de incineradora o composición de los residuos, son susceptibles de producir la totalidad de los 75 PCDDs y 135 isómeros de PCDFs existentes, así como otros 400 compuestos orgánicos." [UKDOE 1989].

Este amplio abanico de PICs halogenados posiblemente se deba a la combustión de residuos halogenados, ya se encuentren los halógenos en forma orgánica (como los haluros de carbono) o en forma inorgánica (como el cloruro de hidrógeno). [Eklund 1988]. En una descripción de la relación entre incineradoras y PCDDs, los investigadores de la USEPA llegaron a la conclusión de que *"se cree que la formación de dioxinas es normalmente el resultado de quemar material orgánico junto con materiales clorados."* [USEPA 1986a].

Los mecanismos de formación de PICs halogenados sólo se conocen parcialmente. Para las moléculas halogenadas más grandes, los científicos han postulado que *"probablemente tengan lugar reacciones de recombinación relativamente lentas en las zonas más frías de la incineradora, tendiendo a producir alcanos altamente fluorados y clorados"*, [Dellinger 1988] (ejemplo: hexacloroetano).

En las emisiones atmosféricas, cenizas y residuos líquidos de muchas incineradoras se han detectado PCDDs y PCDFs. No obstante, la falta de datos cuantitativos completos se ha expuesto de la siguiente manera:

"La información publicada en la literatura acerca de las emisiones de CDD/CDF [PCDD/PCDF] de las incineradoras de residuos peligrosos es escasa, y los datos publicados sobre las mediciones de todos los tetra- a octo- homólogos y e isómeros lateralmente sustituidos, así como sobre los métodos de análisis, muestreo y los datos correspondientes a la medición de las emisiones son incompletos." [USEPA 1989b]. En los informes publicados antes de que rigiese la Normativa Federal de Incineración de Residuos en los EE.UU., la USEPA cita datos de tan sólo dos incineradoras, una de inyección líquida y otra de horno fijo. Según estos datos, la primera emitía tetracloro y pentaclorodibenzofurano en una proporción de 7,3 y 1,7

nanogramos por metro cúbico (ng/m³.) respectivamente, y emisiones de PCDFs de 56 ng/m³. Ninguna serie de datos contemplaba las dioxinas o los furanos hexa, hepta, u octoclorados. Además, es posible que estos datos hayan infravalorado el volumen total de las emisiones, debido a la utilización de técnicas de muestreo que sólo capturan una fracción de los compuestos emitidos. [USEPA 1989b].

El Estudio Nacional de Dioxinas de la USEPA citaba las incineradoras de residuos como una fuente importante de PCDDs y PCDFs al medio ambiente. Una vez más, los datos sobre emisiones atmosféricas de PCDDs/PCDFs son escasos, pero las emisiones totales de dioxinas y furanos resultaron ser como promedio de 80,9 ng/m³ en los 2 hornos rotatorios para los que se disponía de las concentraciones de gases. [USEPA 1987c] En las pruebas realizadas en una incineradora que quemaba residuos clorados industriales, compuestos de virutas de madera tratada, cloruro de polivinilo y sedimentos de pinturas, se detectaron emisiones de PCDD/PCDF en una proporción de 2.915 g/m³. [USEPA 1987c].

En base a estos datos, la USEPA empleó factores de equivalencia tóxica para estimar la toxicidad de las emisiones totales de PCDD/PCDF con respecto a la 2,3,7,8- TCDD(tetraclorodibenzodioxina). El método de conversión utilizado puede considerarse conservador, dado que asignaba una toxicidad 0 a las dioxinas y furanos octaclorados. El estudio encontró que la incineradora que quemaba todo tipo de residuos tóxicos industriales emitía el equivalente en TCDD de 7,4 ng/m³, mientras que las emisiones de la incineradora que quemaba residuos clorados podían alcanzar hasta los 130 ng/m³. [USEPA 1987a].

Suponiendo un caudal promedio de gases de combustión de 250 m³/min [USEPA 1989b] y un tiempo de funcionamiento anual de 7.000 horas, la incineradora de dicho estudio emitía un equivalente en TCDD de dioxinas y furanos de 778 ng/año. Esta cantidad de TCDD sobrepasa la dosis "aceptable" de exposición para 73 millones de personas durante toda su vida, basándose en la dosis específica de riesgo de cáncer establecida por dicha agencia en 0,006 picogramos por kilogramo de peso corporal y día (pg/kg/día). [USEPA 1985b]. Las emisiones anuales de la incineradora industrial de residuos sobrepasaba la dosis de exposición correspondiente a 1.200 millones de personas durante toda su vida.

En 1983, unas pruebas realizadas en la incineradora de Kommunekemie, en Dinamarca, encontraron unas emisiones totales de PCDD de 51,5 ng/m³ en una de las tres incineradoras de la planta. Suponiendo un caudal total de gases de 170.000 m³/hora en las 3 incineradoras de Kommunekemie, las emisiones de dioxinas de toda la planta pueden estimarse en unos 61 gramos por año, suponiendo un tiempo de funcionamiento anual de 7.000 horas [Bergstron 1983].

Se han identificado también PCDDs y PCDFs en las emisiones atmosféricas de los hornos rotatorios de cemento que queman residuos clorados. En 1988 y 1990 uno de estos hornos en California, Estados Unidos, emitió concentraciones de PCDDs y PCDFs de hasta 145 millones ng/año y 346 millones ng/año respectivamente, expresados en equivalentes de la 2,3,7,8-TCDD [KAPCD 1989; Stein 1990]. En otro horno rotatorio se detectaron dioxinas y furanos clorados en las emisiones atmosféricas, a concentraciones de hasta 44,8 ng/m³. (USEPA 1987c). Asimismo, se han documentado emisiones de dioxinas, en concentraciones inferiores, en un horno de cemento en Noruega que quemaba residuos clorados. [Davis 1987].

Se han llevado a cabo escasas investigaciones para cuantificar la concentración de PCDD/PCDF en los residuos de las incineradoras. No obstante, el Estudio Nacional de Dioxinas de la USEPA indicaba que se han detectado PCDDs/PCDFs, incluyendo TCDD, en las cenizas procedentes de varias incineradoras [USEPA 1987c].

Un horno rotatorio que quemaba residuos clorados producía "volantes" con un contenido medio de PCDD/PCDF de 323 ppm; siendo la concentración promedio de compuestos similares a la 2,3,7,8- TCDD de 1,9 ppm. [USEPA 1987b]. Las concentraciones de dioxinas en las cenizas de este horno seguían siendo altas incluso cuando operaba el quemador posterior de la incineradora [USEPA 1987b]. Se encontraron asimismo dioxinas, en concentraciones de 148,2 ppb, en las cenizas de una incineradora industrial que quemaba residuos clorados [USEPA 1987c]. Los análisis realizados por **Greenpeace** sobre las "volantes" de la incineradora de Kommunekemie revelaron una concentración total de PCDD/PCDF de 22 ppb. [Rasmusen 1990].

4.- INCINERACION DE RESIDUOS CON METALES PESADOS

La incineración no destruye los metales. Todo metal introducido en una incineradora pasa posteriormente al medio ambiente, ya sea en forma de emisiones gaseosas o de partículas a la atmósfera, en las cenizas o "volantes" de la incineradora, o en los efluentes de los dispositivos de control de contaminación. Por tanto, las incineradoras no son apropiados para la eliminación de residuos de contenido metálico, según se describe a continuación:

"Todo metal presente en el canal de alimentación de residuos de una incineradora pasa directamente al humo de la chimenea, a las "volantes", al agua de lavado y a las cenizas (según sea el caso de cada instalación). Dado que muchos metales pesados son tóxicos incluso a concentraciones mínimas (como es el caso del plomo, mercurio, cadmio, cromo, etc.), su presencia en el medio ambiente y la exposición a ellos por parte del hombre es un asunto grave... Es evidente que el evitar introducir metales en una incineradora supera con mucho cualquier esfuerzo posterior para su captura." [Cook 1989].

Segun estimaciones de la USEPA, algunas incineradoras de residuos peligrosos en los Estados Unidos emiten al aire metales pesados en cantidades suficientes como para suponer un riesgo de cáncer de hasta un 5 por 1.000 en la población, excediendo unos límites de concentración en el medio ambiente que son asociados a efectos tóxicos sobre el organismo en el caso de "la mayoría de los individuos expuestos" que habiten los alrededores de estas instalaciones. [USEPA 1990]. La USEPA ha llegado a la siguiente conclusión:

"Los riesgos que entraña la incineración de residuos peligrosos que contengan metales pesados pueden resultar inaceptables en caso de complicaciones razonablemente posibles... Los metales pueden suponer un importante riesgo para la salud." [USEPA 1990].

En la incineración de residuos peligrosos, la presencia de cualquier metal es preocupante. Al menos 19 metales pesados distintos han sido detectados en las emisiones de las incineradoras o en los flujos de residuos comerciales que se incineran en los hornos rotatorios. Estos metales se relacionan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 METALES DETECTADOS EN LA ALIMENTACION O EMISIONES DE INCINERADORAS DE RESIDUOS PELIGROSOS	
Antimonio	
Arsénico	
Bario	
Berilio	
Bismuto	
Cadmio	
Cromo	
Cobre	
Hierro	
Plomo	
Magnesio	
Manganeso	
Mercurio	
Selenio	
Plata	
Talio	
Titanio	
Zinc	
Níquel	
Fuente: Carroll 1989, Stein 1990, USEPA 1990	

En algunos casos la incineración puede alterar la forma física o química de los metales, por ejemplo, de metal elemental a óxido metálico o a un complejo organometálico, o bien de un estado físico sólido a uno

de vapor o a partículas finas. Estos cambios pueden producir un aumento de la toxicidad. Por ejemplo, los óxidos de cromo, hierro y zinc; así como ciertas formas organometálicas del mercurio, manganeso y níquel, son de mayor toxicidad que los correspondientes metales elementales. [Dreisbach 1987].

FACTORES QUE AFECTAN LA DISTRIBUCION DE LOS METALES

La distribución de metales en emisiones atmosféricas, cenizas y residuos de los PCDs se halla controlada por factores tales como la temperatura, el contenido de cloro del residuo y la eficiencia de los PCDs.

Aquellos metales que son vaporizados a la temperatura encontrada en la incineradora (plomo, mercurio, cadmio, molibdeno, níquel y zinc) salen de la zona de llamas en estado gaseoso, condensándose parcialmente en partículas a medida que recorren la chimenea. Este proceso resulta en el enriquecimiento de dichos metales tanto en las volantes como en las cenizas, y en los gases emitidos en la chimenea. Los metales menos fáciles de volatilizar tienden a concentrarse en las cenizas de la incineradora. Estos metales de menor volatilidad incluyen el aluminio, cromo, cobre, magnesio, manganeso y vanadio [Day 1985].

En el caso de muchos metales, una mayor temperatura favorece su volatilización, lo que produce una mayor concentración de metales en los gases de la chimenea y en partículas. Dado que los metales enlazados a átomos de cloro suelen ser más volátiles que en su estado elemental o en oxidación, una concentración elevada de cloro tiende a acelerar también el proceso de volatilización [Day 1985, Sorbo 1986, Murphy 1984].

Uno de los estudios detallados de una incineradora rotatoria de cemento para residuos peligrosos revela la presencia de metales pesados, distribuidos en las emisiones y residuos de la incineradora, según se indica más adelante. En todos los casos de metales analizados, se halló que como promedio el 20% de éstos era emitido en los gases de la chimenea. Este porcentaje resultó ser más elevado en el caso del plomo y el cadmio, cuyas emisiones a la atmósfera alcanzaron aproximadamente el 50%. [Carroll 1989]. Estos resultados son consistentes con los del Oak Ridge National Laboratory, que indica que *"hasta un 53% del metal quemado en una incineradora puede ser emitido en los gases de la chimenea."* [Travis 1984]. Los porcentajes de cada metal en los gases de la chimenea, las cenizas y el agua de lavados se detalla en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2
DISTRIBUCION DE METALES EN UNA INCINERADORA DE RESIDUOS PELIGROSOS

Porcentajes sobre cifras totales de metales medidos

Contaminante	Gas de chimenea	Cenizas	Agua de Lavado
Arsénico	3,8-5,8	86,1	8,2
Bario	2,2	79,6	18,2
Bismuto	41,1	22,2	36,7
Cadmio	56,0-61,0	<10,7	27,0-31,0
Cromo	2,0	94,1	3,9
Cobre	15,1	75,8	9,1
Plomo	48,9	15,0	36,1
Magnesio	0,1	99,3	0,6
Estroncio	1,7	93,0	5,3
PROMEDIO	19,4	64,0	16,3

Nota: Contenido de cloro 3,8 %; temperatura de salida del horno 1612 °, temperatura de salida del quemador posterior 1990 °F
Fuente: Carroll 1989.

De entre todas las variables examinadas, se halló que el contenido en cloro del residuo alimentado era el

factor de mayor impacto sobre la distribución de los metales. Manteniendo constantes las temperaturas del horno rotatorio y del quemador posterior, y elevando la concentración de cloruros de 0 al 8,3%, "el porcentaje global de repartición de metales en la ceniza del horno disminuyó del 81 al 63%." Al mismo tiempo las emisiones a la atmósfera de metales se multiplicaron por 7. Los aumentos más significativos fueron los correspondientes al plomo, cobre y magnesio. Solo el estroncio no imitó este comportamiento. [Carroll 1989]. El efecto del aumento de la concentración de cloruros sobre la distribución de los metales seleccionados se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3
EFFECTO DEL CONTENIDO DE CLORO EN LA DISTRIBUCION DE METALES EN UN HORNO ROTATORIO

Incremento porcentual de las concentraciones de metales en las emisiones al aire (respecto al 0 % Cl)

Metal	3,8 % de cloro	8,3 % de cloro
Arsénico	146,1	125,6
Bario	10,0	20,0
Bismuto	161,8	144,6
Cadmio	21,9	47,9
Cromo	42,9	100,0
Cobre	1787,5	4050,0
Plomo	321,5	534,5
Magnesio	233,3	566,7
PROMEDIO	340,6	698,7

Temperatura del horno 1600° F +/- 12 °F; temperatura del quemador posterior 2000 °F +/- 10 °F
Fuente: Adaptado de Carroll 1989.

En el estudio, se comprobó que la temperatura del horno tiene "efectos poco importantes" en la distribución de los metales, favoreciendo las temperaturas altas pequeños aumentos de las emisiones de plomo, cadmio y arsénico en los gases de la chimenea. [Carroll 1989]. Como resultado, al aumentar los operarios de una incineradora la temperatura, suponiendo que así se favorece la destrucción de los residuos orgánicos, pueden aumentar inadvertidamente las emisiones de metales pesados a la atmósfera.

Tanto la temperatura del horno como el contenido de cloruros tiene un impacto negativo sobre la eficiencia de los dispositivos de control de contaminación. Al aumentarse la temperatura y la concentración de cloruros, la eficiencia de la torre de lavado de gases -medida como la fracción de metales entrante capturada por este dispositivo- disminuye desde un máximo de 56% a un mínimo de 33%. Al aumentarse la temperatura del horno de 825 °C a 927 °C, la eficiencia de la torre de lavado de gases disminuye del 51% al 31% para el cadmio y del 42% al 25% para el plomo [Carroll 1989]. Este fenómeno se explica teniendo en cuenta que en condiciones de mayor temperatura y contenido en cloro, la proporción de metales en fase gaseosa es también mayor.

Como muestra la Tabla 4.4, un aumento en el contenido de cloruros en la alimentación de residuos disminuye la eficiencia de la torre de lavado de gases, especialmente en el caso del plomo, cobre, arsénico, bismuto y cadmio. La eficiencia de la torre de lavado de gases se expresa como la cantidad de metales capturados en los residuos del mismo, dividida por la suma de dicha cantidad más la cantidad de metales presentes en las emisiones a la atmósfera tras haber pasado por dicho dispositivo.

Tabla 4.4
EFFECTO DEL CONTENIDO DE CLORO EN LA EFICIENCIA DE LA TORRE DE LAVADO DE GASES DE LA INCINERADORA

Eficiencia de la torre de lavado de gases (%)

Metal	3,8 % de cloro	8,3 % de cloro
Arsénico	63	38
Bario	89	89
Bismuto	47	40
Cadmio	38	ND
Cromo	66	65
Cobre	38	21
Plomo	42	22
Magnesio	86	83
Estroncio	76	83
PROMEDIO	60,6	54,6

Temperaturas del horno 1600 °F +/- 12 °F; temperatura del quemador posterior 1994° F +/- 4 °F.

ND = No hay datos

Fuente: Carroll 1989.

Se han observado asimismo mayores emisiones a la atmósfera de metales volátiles al aumentarse la concentración de cloruros en hornos rotatorios de cemento y hormigón [Day 1985, Mourningham 1987, y Murphy 1984]. La incineración de residuos clorados en hornos de cemento va acompañada también de un aumento en la emisión de partículas de hasta un 203% respecto a la incineración con combustible no clorado. [Mourningham 1987].

EMISIONES DE METALES A LA ATMOSFERA

La información disponible para cuantificar las emisiones totales de metales pesados de las incineradoras de residuos es limitada. Como ya se ha dicho anteriormente, estas emisiones varían directamente según la cantidad de metales alimentada a la incineradora.

En un estudio de la documentación disponible, la USEPA concluye que *"no se han llevado a cabo suficientes análisis sobre los niveles de metales en las emisiones de las incineradoras, por lo cual no pueden determinarse promedios, ni niveles críticos razonables de las emisiones metálicas que caben esperarse de las incineradoras."* [USEPA 1990].

En un estudio de 8 incineradoras, las emisiones atmosféricas de plomo alcanzaron hasta los 10,4 kilogramos/día en una de ellas, lo que equivale a 2,715 toneladas al año, considerando los promedios de tiempo de operatividad de estas instalaciones. Las emisiones de cadmio fueron de 30,3 kilogramos, y las de níquel de hasta 205 kilogramos anuales, usando promedios de tiempo de operatividad. *"Todos estos metales son considerados perjudiciales para la salud, incluso a concentraciones extremadamente bajas"*, ha escrito el autor [Trenholm 1984].

Una incineradora comercial de dimensiones corrientes (con capacidad para incinerar 31.700 toneladas al año), que incinere residuos con un contenido medio de metales de un 1,50% (Stein 1990), emitirá aproximadamente 92 toneladas de metales pesados al año en las emisiones de su chimenea, basándose en los promedios de distribución de metales indicados en la Tabla 4.2. Dicha incineradora liberaría asimismo 304 toneladas anuales de metales en las cenizas y 77 toneladas de metales en las aguas de lavado.

A pesar de que algunos metales pueden ser emitidos en fase de vapor, la mayor parte de ellos son depositados sobre la superficie de partículas muy finas [Trenholm 1988]. Una parte de dichas partículas "enriquecidas" se emiten a la atmósfera, siendo, debido a su pequeño tamaño, fácilmente inhaladas por el hombre [Montague 1989].

PRESENCIA DE METALES EN LOS RESIDUOS DE LA INCINERADORA

En un estudio de residuos de una incineradora se ha demostrado que, por término medio, la cantidad de metales presentes en las cenizas de una incineradora se cifra en 10.000 ppm, o aproximadamente el 1% del total de cenizas. (Van Buren 1987). Otro estudio revela cantidades aun mayores de metales según se detalla en la Tabla 4.5.

Metal	Concentración (ppm)
Antimonio	8,0
Arsénico	42,0
Bario	150
Berilio	< 0,2
Cadmio	2,0
Cromo (hexavalente)	0,083
Cromo (total)	71,0
Cobre	13.800
Plomo	30,0
Mercurio	0,2
Níquel	190
Selenio	<1,0
Plata	0,4
Talio	2,0
Zinc	280
Total	14.576,9

Fuente: Boegel 1987

Los metales contenidos en las cenizas, con el tiempo, llegan hasta el hombre. Durante su almacenamiento, transporte y eliminación, las cenizas penetran en el medio ambiente. Como ya se ha mencionado anteriormente, muchos de estos metales se hallan en estado de fácil lixiviado, al encontrarse depositados en partículas finas, más propensas a escapar del depósito de seguridad debido a su mayor área de superficie en relación al residuo original. [Montague 1990]. Un estudio que somete las cenizas de una incineradora a condiciones de enterramiento simulado, encontró niveles "bastante elevados" de cobre, níquel y zinc en la simulación de agua filtrada, así como niveles detectables de todos los metales que se encontraban presentes en las cenizas. [Boegel 1987].

Normalmente, los efluentes de los dispositivos de control de contaminación son tratados y vertidos a aguas superficiales. Una importante cantidad de los metales contenidos en el efluente son concentrados en los sedimentos que origina este tratamiento, y el resto es vertido al agua [USEPA 1986b]. Los sedimentos habitualmente se entierran, pudiendo desde allí filtrarse a las aguas subterráneas. La Tabla 4.6 detalla los resultados de un estudio sobre la concentración de metales en los efluentes de los PCDs y en el sedimento de dicho tratamiento.

Tabla 4.6

METALES EN LOS EFLUENTES DE LA TORRE DE LAVADO DE GASES Y EN LOS SEDIMENTOS DEL TRATAMIENTO

Metal	Efluentes (ppb)	Sedimentos (ppb)
Antimonio	4.000	313.000
Arsénico	600	140.000
Bario	<1.000	183.000
Cadmio	700	400.000
Cromo (hexavalente)	526	<10
Cromo (total)	1.400	555.000
Cobre	11.000	8.300.000
Plomo	2.000	1.600.000
Mercurio	<100	60.000
Níquel	4.000	2.200.000
Plata	<200	600
Talio	<1.000	3.000
Zinc	8.000	3.100.000

Fuente: Boegel 1987.

5.- IMPACTO DE LA INCINERACION DE RESIDUOS PELIGROSOS SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

Las emisiones de las incineradoras contienen muchos productos contaminantes de alta toxicidad, persistentes y bioacumulativos. Con el tiempo, hasta las emisiones más pequeñas de dichas sustancias pueden alcanzar concentraciones en los ecosistemas locales que sean perjudiciales, de manera crónica o aguda, para el hombre y otras especies. Además, estas emisiones contribuyen también a una contaminación global, ya que son fácilmente transportadas por aire y agua.

No existen los datos necesarios para poder realizar una predicción sobre el destino y efectos de las emisiones individuales de cada incineradora, tal como se detalla a continuación:

- Solamente una fracción de los PICs de las incineradoras han sido identificados químicamente.
- La identificación y cuantificación de las emisiones de metales es incompleta.
- La toxicidad de la mayor parte de los PICs y metales no ha sido evaluada en su totalidad.
- Existe poca información acerca de los efectos de una exposición crónica a bajas concentraciones de productos tóxicos.
- Se tiene poca información acerca de los efectos sinérgicos de una exposición a distintas combinaciones de productos tóxicos.
- La dispersión, asimilación, transformación y acumulación de los PICs y metales emitidos por las incineradoras han sido estudiados tan sólo de forma superficial.

Asimismo, los organismos oficiales han demostrado poco interés por intentar evaluar las repercusiones reales que sobre la salud pública y el medio ambiente tiene el funcionamiento rutinario de las incineradoras de residuos peligrosos. Sin embargo, a continuación se citan algunos de los pocos casos en los que se han llevado a cabo investigaciones, oficiales o no, sobre este tema.

-Un estudio epidemiológico publicado recientemente en Gran Bretaña establece una "*marcada concentración*" de casos de cáncer de laringe entre la población adulta de una comunidad situada a menos de 2 kilómetros de distancia de una incineradora de residuos comerciales. [A. Travis 1989].

-Un estudio llevado a cabo en Alsen, Louisiana (EE.UU.) donde está situada una incineradora de residuos gestionada por la empresa Rollins Inc., detalla 3 casos de muerte por cáncer entre los vecinos de una manzana de 9 casas, y otro en el que dos niños de una misma familia también padecen esta enfermedad. Una investigación sanitaria realizada en 1980 revela que el 80% de la población padecía cefáleas, dificultades respiratorias y problemas sinusoidales. Otro estudio más reciente detalla que el 20% de la comunidad padecía de asma, frente al 7% existente en un grupo de control. [Sanjour 1990].

-Una investigación realizada en Escocia documentó un aumento en el índice de nacimiento de gemelos en aquellas zonas más expuestas a la contaminación de incineradoras de residuos químicos. En esta misma zona, y por la misma época, se documentó también un "*aumento dramático*" en los casos de nacimiento de gemelos entre el ganado vacuno. Los científicos que realizaban el estudio relacionaron estos hechos con las emisiones atmosféricas de "*hidrocarburos policlorados, algunos de los cuales tienen propiedades estrógenas.*" [Lloyd 1988].

-Un estudio médico llevado a cabo en El Dorado, Arkansas (EE.UU.), emplazamiento de la incineradora de residuos peligrosos de la empresa ENSCO, reveló un "*índice elevado de cáncer en la población*". Por ejemplo, el índice total de cáncer excedía en 2,7 veces la tasa considerada normal en poblaciones de tamaño similar. Existían además 6 casos del síndrome de Guillian-Barre, una rara enfermedad para la que cabría esperar una incidencia cero en una comunidad de ese tamaño. [Sanjour 1990].

-En Amelia, Louisiana (EE.UU), donde existe un horno rotatorio utilizado por la empresa Marine Shale Processors para la incineración de residuos comerciales peligrosos, se han documentado 5 casos de neuroblastoma infantil, un raro cáncer del tejido nervioso en una comunidad en la que cabría esperar una incidencia cero. Estos casos no han podido ser definitivamente vinculados al funcionamiento de la incineradora [McGill 1989].

Es probable que de invertirse recursos en más estudios de esta índole, saliesen a la luz otros casos de impacto en el medio ambiente y la salud. Sin embargo, y a falta de una investigación epidemiológica exhaustiva, los datos que hay disponibles sobre la toxicidad de algunos productos químicos que se sabe son emitidos por las incineradoras puede servir para al menos indicar el impacto que cabe esperarse de la incineración de residuos peligrosos.

TOXICIDAD

Tanto a concentraciones altas como bajas, las sustancias contenidas en las emisiones de las incineradoras pueden afectar la salud pública. Ciertos productos contaminantes emitidos por las incineradoras, tales como las dibenzodioxinas y los dibenzofuranos policlorados (PCDDs y PCDFs) ejercen efectos, transmisibles por herencia, sobre los sistemas fisiológicos de muchas especies, incluso a dosis extraordinariamente bajas. Por ejemplo, nunca se ha podido establecer la existencia de niveles de exposición a ciertos productos de manera que no produzcan efecto alguno sobre el organismo (el llamado "umbral de seguridad"). Es el caso del impacto de la 2,3,7,8- tetraclorodibenzodioxina (TCDD) sobre el sistema reproductor y el desarrollo [Streisinger 1980, Kimmel 1987], así como sobre el sistema inmunológico [Sonawane 1987]. Otro ejemplo es el efecto que sobre el sistema nervioso y el desarrollo tiene el plomo [Needleman 1989, Needleman 1980], y para cuya exposición tampoco ha podido establecerse el umbral de seguridad.

Se cree que el efecto cancerígeno y mutagénico de un producto químico sigue una pauta de comportamiento que no contempla un umbral de seguridad, de manera que incluso una molécula del producto cancerígeno o mutagénico puede iniciar un proceso de mutación o multiplicación celular que degenera en enfermedad. [Kamrin 1988, Epstein 1989]. Algunos investigadores han sugerido este tipo de impacto sin umbral de seguridad en el caso de efectos específicamente neurotóxicos [USOTA- Oficina de Estimación Tecnológica del Congreso de los Estados Unidos- 1990], de alteración del desarrollo [Shane 1988] y del sistema reproductor [Shane 1988], asociados a la exposición a cualquier producto químico sintético.

Respondiendo a la preocupación existente sobre tales efectos a bajas dosis, el Comité Científico Asesor de la USEPA ha publicado la siguiente advertencia sobre los impactos potenciales en los seres humanos de las emisiones atmosféricas de las incineradoras:

"La detección de efectos leves puede tener consecuencias significativas para individuos y poblaciones. Los efectos en el comportamiento y en las funciones fisiológicas tienen lugar frecuentemente con exposiciones significativamente inferiores a las que se requieren para producir efectos agudos observables." [USEPA 1985a].

Naturalmente, no pueden evaluarse la toxicidad y efectos ambientales de aquellos PICs que aún no han sido identificados. Un investigador ha declarado que: *"es especialmente importante la cuestión de si el 90-99% de los hidrocarburos no identificados (en las emisiones de las chimeneas de las incineradoras) puede suponer un riesgo significativo para la salud."* [Travis 1984].

Incluso en el caso de aquellos PICs que han sido identificados, los datos toxicológicos no son completos. Respecto al gran número de productos químicos en circulación, la Oficina de Estimación Tecnológica del Congreso de los Estados Unidos ha indicado que *"se desconocen los riesgos que para la salud humana puede suponer la exposición a la gran mayoría -90% ó más- de los productos contenidos en los distintos residuos"*. [US OTA 1987].

Refiriéndose a las implicaciones generales de las incineradoras de residuos y a dicha falta de datos, el Comité Científico Asesor de la USEPA ha comentado:

"Se desconoce en su mayoría la toxicidad de las emisiones y efluentes de las incineradoras terrestres y oceánicas. No se dispone de análisis relativamente completos ni fiables de las emisiones masivas de

estas instalaciones, necesarios para una estimación posterior del impacto potencial que puede suponer su exposición al medio ambiente... Asimismo, se carece por completo de una evaluación acerca de los riesgos potenciales de esta exposición para la vida silvestre, flora y ecosistemas terrestres en general. Tampoco existen datos sobre la toxicidad de las emisiones concretas de mezclas de productos." [USEPA 1985a].

Menos se sabe todavía del impacto que suponen las mezclas de productos, que pueden causar efectos tóxicos, sinérgicos, aditivos o inhibitorios. El equipo científico del Programa Toxicológico Nacional de los EE.UU. ha realizado un cálculo sobre el número y coste de los experimentos que serían necesarios para un estudio de los efectos de la exposición a una mezcla de 25 productos químicos comunes. La realización de un estudio de una duración mínima de 13 semanas sobre los efectos que tendría la exposición a bajas dosis de un producto químico concreto se ha estimado en unos 3 trillones de dólares, dado que sería necesario llevar a cabo unos 33.554.432 experimentos distintos. [Yang 1987]

Actualmente, existen unos 60.000 productos químicos distintos en circulación [US OTA 1987], y los PICs presentes en las emisiones de las incineradoras se estiman en varios miles [USEPA 1990]. En estas circunstancias, es muy poco probable que pueda reunirse nunca la información necesaria para la estimación de los efectos de las emisiones de las incineradoras.

Dioxinas y otros haluros de carbono complejos

Las dioxinas y furanos policlorados son sólo uno de los muchos grupos de PICs halogenados complejos emitidos en las incineradoras que tratan residuos con contenido en flúor, cloro, bromo o yodo. Este grupo de productos químicos -especialmente las TCDD- ha sido objeto de mayor atención científica, pública y legal que cualquier otro PIC. Esta atención se debe, en parte, al reconocimiento del hecho de que estos contaminantes, de una extraordinaria toxicidad, persistencia y bioacumulatividad, se encuentran en la actualidad enormemente dispersos por el medio ambiente y la población humana.

Incluso a las dosis más pequeñas, ensayadas en animales de laboratorio -en concentraciones de partes por trillón o incluso cuatrillón- se ha encontrado que el TCDD induce cáncer [USEPA 1989b], defectos de nacimiento y reducción de la fertilidad [USEPA 1985a], inhibición inmunológica [Sonawane 1987] y dificultades neurológicas, en el desarrollo y el comportamiento [Schantz 1986, Bowman 1989a, Bowman 1989b]. Uno de los principales expertos en dioxinas, el Dr. Donald Barnes, ha comparado el efecto de las interacciones biológicas de las dioxinas con el de las hormonas, de las cuales una sola molécula en una célula es suficiente para iniciar una reacción en cadena. [Luoma 1990]

"En términos de su potencia a bajas concentraciones, el 2,3,7,8- TCDD y la mezcla HxCDD (hexaclorodibenzo-p-dioxina) son los dos cancerígenos más potentes evaluados por el Grupo de Evaluación de Cancerígenos de la USEPA", de acuerdo a un estudio exhaustivo sobre dioxinas realizado por la USEPA [USEPA 1985b]. Un solo gramo de dioxina se considera suficiente para inducir un riesgo de cáncer de un uno por millón, durante toda su vida, a 93 millones de adultos, basándose en la dosis de riesgo calculada por la USEPA en 0.006 pg/kg/día [1985b]. Además de su capacidad directa para inducir cáncer, el TCDD potencia asimismo el efecto cancerígeno de otros productos. Según el anterior director del Grupo de Evaluación de Cancerígenos de la USEPA:

"No existe una base teórica sobre la cual realizar estimaciones, incluso aproximadas, del riesgo que entraña la exposición a productos promotores y co-cancerígenos, dado que no se conocen bien los mecanismos de promoción y dado también que no puede cuantificarse el grado total de exposición de la población a los numerosos productos cancerígenos presentes en el medio ambiente. No obstante, es posible que el TCDD potencie significativamente el riesgo de cáncer en los seres humanos, actuando como co-cancerígeno o promotor incluso a niveles extraordinariamente bajos de exposición." [Albert 1980]

El TCDD y otros PICs halogenados similares pueden tener un profundo impacto a largo plazo sobre el intelecto y el comportamiento. Por ejemplo, al suministrarse TCDD en dosis de 5 a 25 partes por trillón a monos Rhesus hembras, sus crías evidenciaron desarreglos neurológicos y de comportamiento, incluyendo

una disminución de reacción a estímulos visuales, dificultades de aprendizaje, aumento de agresividad en grupos de edad similar, y alteración de la relación con sus madres. [Schantz 1986, Bowman 1989a, Bowman 1989b]

En otro estudio se evidencia una disminución estadísticamente significativa de las funciones cognitivas en los niños de mujeres que durante su embarazo consumieran pescado de los Grandes Lagos, cuyo ecosistema, a todos los niveles, se halla contaminado por PCBs (haluros de carbono, presentes también en los PICs de las incineradoras, entre otras fuentes). Los efectos incluían una capacidad de respuesta emocional disminuida, una disminución de las funciones visuales, verbales y de memoria cuantitativa, así como una disminución del peso al nacer y el volumen craneal [Fein 1984, Jacobson 1990]. Estos efectos dependían de la dosis de PCBs administrada, por medio de una exposición prenatal a través de la placenta, de la madre al hijo. [Jacobson 1990]

Existen algunos datos experimentales que documentan los efectos del TCDD sobre la salud de los seres humanos. La realización de estudios epidemiológicos sobre su efecto en la salud humana es una tarea árdua, especialmente en lo que respecta a efectos a muy largo plazo, como la aparición de cáncer. Tales dificultades aumentan en el caso del TCDD y otros PCDFs/PCDDs, que se encuentran presentes actualmente en toda la población. Al no existir, por tanto, grupos no expuestos que puedan servir de comparación, los estudios epidemiológicos deben mostrar resultados muy claros a fin de evidenciar un incremento de efectos sobre la salud al aumentar la exposición. Dado que la exposición al TCDD se produce en combinación con otros productos tóxicos -en emisiones de incineradoras, efluentes de plantas de celulosa, pesticidas contaminados, etc.- sus efectos sobre la salud humana se hacen todavía más difícil de demostrar.

A pesar de todos estos problemas, un equipo científico que ha examinado la literatura existente hasta la fecha sobre los veteranos de la guerra del Vietnam, expuestos al TCDD a través del Agente Naranja, ha hallado una relación estadística concluyente entre la exposición a dicho herbicida y sus contaminantes y un elevado índice de linfomas (no de Hodgkins) y de sarcomas de tejidos blandos (un tipo de cáncer), así como alteraciones cutáneas, toxicidad subclínica del hígado y porfiria cutánea tardía (desarreglo metabólico). Los autores encontraron, asimismo, que el peso de la evidencia indicaba la existencia de una relación estadísticamente significativa entre la exposición a este producto y la aparición de la enfermedad de Hodgkins y efectos neurológicos, reproductivos y sobre el desarrollo. Finalmente, los autores encontraron datos que sugerían, aún sin confirmación estadística, que el grupo expuesto padecía elevados índices de leucemia, cánceres en siete órganos distintos, efectos psicológicos y dificultades sociales, así como anomalías inmunológicas y otros efectos. [Clapp et al 1990]

Este mismo estudio citaba otros estudios epidemiológicos llevados a cabo, y que han evidenciado los siguientes efectos: toxicidad inmunológica y hepática en los individuos expuestos al TCDD en Missouri (EEUU), sarcoma de tejidos blandos en individuos expuestos al TCDD en Suecia, anomalías neurológicas en trabajadores y otros individuos expuestos al TCDD en varias áreas (incluyendo Seveso, Italia), elevados índices de defectos congénitos en individuos potencialmente expuestos a dioxinas en Seveso (Italia) y Michigan (EEUU) y un elevado riesgo de cáncer en los trabajadores de Monsanto (Italia) y Virginia del Este (EEUU), al correlacionarse los estudios para eliminar errores accidentales o sistemáticos. [Clapp et al. 1990]

Otros compuestos aromáticos halogenados, tales como otras variedades de PCDDs, los PCDFs, clorofenoles, clorobenzenos, y bifenilos policlorados (PCBs), polibromados (PBBs) y cloronaftalenos, parecen tener un efecto similar al TCDD, utilizando posiblemente mecanismos similares. No obstante, en el caso de estos compuestos se requieren dosis mayores para la manifestación de dichos efectos que con el TCDD [Webster 1990, USEPA 1985b].

Muchos PICs halogenados -desde el tetracloruro de carbono a los PCDFs- tienen también un efecto cancerígeno probable, y confirmado en algunos casos. [US OTA 1987]. La capacidad de estos compuestos de actuar como promotores se ha investigado en muy pocos casos, si es que se ha investigado en alguno.

Los PCBs, clorofenoles, cloruro de vinilo y tricloroetileno -todos ellos PICs identificados en las emisiones

atmosféricas de las incineradoras de residuos peligrosos- han sido asociados a efectos adversos sobre la reproducción en los seres humanos. [Burmester 1892, Lave 1987, Nelson 1986, Seyler 1984]. Como ya se ha mencionado anteriormente, los PCBs han sido también relacionados con defectos de nacimiento y deficiencias en el desarrollo neuronal en seres humanos [Jacobson 1988].

PICs No Halogenados

Los PICs no halogenados comprenden cientos de compuestos de diversa toxicidad. Los hidrocarburos de cadena sencilla (etano, metano, propano y acetileno) son de toxicidad relativamente baja. Los hidrocarburos aromáticos sencillos (benceno, tolueno, xileno) pueden causar leucemia, defectos de nacimiento, efectos sobre el sistema nervioso, y enfermedades sanguíneas [US OTA 1987]. Los hidrocarburos de anillos condensados (p. ej., benzo-a-pireno) pueden ser cancerígenos, y alguno de ellos teratógenos [US OTA 1987]. La exposición a los ésteres del ácido ftálico puede causar desarreglos metabólicos, aumento del tamaño del hígado y riñones, y cáncer [US OTA 1987]. Otros autores han informado de una disminución en la densidad del esperma en varones expuestos a dichos ésteres [Murature 1987]

Metales Pesados

Según la Oficina de Evaluación Tecnológica de los EE.UU., "*los metales pesados pueden inducir una gama de efectos sobre la salud humana - letales, subletales, agudos y crónicos.*" [US OTA 1987] Incluso los metales más comunes pueden tener un serio impacto sobre la salud y el medio ambiente. Por ejemplo, se cree que los vapores de óxido de hierro pueden ser cancerígenos [Sax 1989]. No obstante, los metales considerados más preocupantes en la incineración de residuos son aquellos cuyo efecto cancerígeno se sospecha o sabe, como es el caso del cadmio, cromo, níquel, arsénico y berilio. [USEPA 1990]

Se sabe que estos metales, junto con el plomo, mercurio y zinc, que se hallan presentes frecuentemente en los residuos de incineración, causan lesiones neurológicas y pulmonares en los seres humanos [NML 1990]. Otros causan lesiones hepáticas, renales y en el páncreas [US OTA 1987].

Los niños en edad de crecimiento son especialmente vulnerables a las lesiones neurológicas causadas por dichos metales, [Shane 1988] y se cree que la exposición al plomo ha causado ligeros déficits del funcionamiento intelectual en la mayoría de los niños en los EE.UU. [Needleman 1989, Needleman 1980]. Muchos de dichos metales tienen además un efecto tóxico sobre el sistema reproductivo, afectando la fertilidad humana, el tejido genético o el desarrollo del embrión. [REPROTOX 1989]

DESTINO AMBIENTAL Y VIAS DE EXPOSICION A LOS CONTAMINANTES

Es un hecho comprobado que los PICs y metales emitidos por las incineradoras "*se dispersan a través del hemisferio*" [USEPA 1985a]. Una vez dispersos en el aire, agua y suelo, muchas de dichas sustancias se bioacumulan, siendo selectivamente filtradas del medio ambiente por los tejidos de los seres vivos. Además, pueden también biomagnificarse, incrementándose su concentración a lo largo de los niveles tróficos de la cadena alimenticia.

Los organismos situados en los niveles tróficos más elevados de la cadena, como los seres humanos y otras especies depredadoras, sirven como depósito final para estos contaminantes persistentes y bioacumulativos. Aunque la concentración de dichas sustancias en el suelo, aire, y agua pueda ser baja, los efectos de la bioacumulación y biomagnificación pueden generar en dosis significativas en seres humanos y otros organismos.

Exposición por la cadena alimenticia acuática

En muchos casos, se ha demostrado la bioacumulación en los ecosistemas acuáticos de los productos y metales presentes en las emisiones y residuos de las incineradoras. Por ejemplo, se ha demostrado que algunos peces acumulan concentraciones de TCDD que superan hasta 159.000 veces las concentraciones

existentes en el entorno acuático en que habitan. [USEPA 1988a]. Como resultado, un ser humano que consume 250 gramos de dicho pescado recibirá una dosis de TCDD equivalente a beber 38.000 litros de agua contaminada. Otros PICs halogenados, incluyendo los PCBs, hexaclorobenceno y fenoles policlorados, poseen también un acusado efecto biomagnificativo. [USEPA 1985c]

Se ha documentado una importante acumulación de haluros de carbono en los ecosistemas acuáticos, incluyendo los Grandes Lagos y el río Saint Lawrence [Colborn 1990], el río Mississippi (EE.UU.) [Costner 1989], y el mar Báltico [Rappe 1987]. En ciertos casos, es evidente que la concentración de tales contaminantes es ya lo suficientemente grave como para suponer una amenaza a aquellas especies situadas en la cumbre de la cadena alimenticia.

Los organismos marinos tienen tendencia -aunque con un factor menor de biomagnificación- a acumular hidrocarburos no halogenados, incluyendo los PAHs (Hidrocarburos Aromáticos Polinucleados) y los ftalatos que se encuentran en los residuos de las incineradoras. [USOTA 1987]

Algunos metales emitidos por las incineradoras pueden también ser acumulados por los peces y otros organismos acuáticos. Los factores de bioconcentración de algunos metales pesados se detallan en la tabla 5.1. Aparte de los metales que se detallan, el selenio acusa también una tendencia a biomagnificarse en las cadenas tróficas del ecosistema acuático [US OTA 1987].

En referencia a todo tipo de residuos (incluyendo residuos peligrosos y basuras) un estudio menciona que *"la incineración de residuos se está convirtiendo en una de las principales fuentes de emisión de mercurio a la atmósfera en muchos países industrializados"*, [Lindqvist 1986]. Según este estudio, la contaminación por mercurio de los ecosistemas acuáticos es un problema *"en todos los países industrializados del hemisferio norte; (...) ciertos peces de agua dulce han acumulado niveles de mercurio tales que impiden su utilización como alimento sin pasar por un sistema de control (...) Las emisiones de mercurio por obra del hombre han causado graves efectos ambientales en extensas zonas del hemisferio norte. Estos son problemas a largo plazo"*. [Lindqvist 1986]

Exposición a través de cosechas

Se ha demostrado que muchos de los contaminantes emitidos por las emisiones atmosféricas de las incineradoras se depositan y son asimilados por las plantas de cultivo. Para los contaminantes transportados por aire, los mayores índices de exposición corresponden a aquellos cultivos en los que la parte comestible queda expuesta (p. ej., espinacas frente a aguacates). [Stein 1990]. Aunque un buen lavado puede eliminar una parte de dichos contaminantes depositados en la superficie, una cantidad importante (normalmente entre el 15% y el 50%) permanece adherida. [Stein 1990] Los PICs, incluyendo los haluros de carbono, probablemente también se depositen de esta manera.

Tabla 5.1
FACTORES DE BIOCONCENTRACION DE METALES PESADOS ESPECIFICOS

Metal	Factor de Bioconcentración
Arsénico	44
Berilio	19
Cadmio	81
Cromo	16
Plomo	49
Mercurio	63.000 (1)
Zinc	85 / 16.700(2)

Fuentes: Factores de bioconcentración (FBC) para peces de agua dulce, adaptados de USEPA 1979 y citados por Stein, excepto los siguientes: (1) FBC de peces de agua dulce del Banco de Datos de Sustancias Peligrosas, base de datos en línea Medlars, Biblioteca Nacional de Medicina, Betseda, MD 1990. (2) Intervalo de FBCs para crustáceos de agua dulce procedente del Banco de Datos de Sustancias Peligrosas, op.cit.

Los metales pueden ser incorporados del suelo contaminado al tejido mismo de las plantas. El grado de asimilación varía considerablemente, dependiendo del metal y el tipo de cultivo. Los promedios de índices de asimilación han sido resumidos por Baes et al., y se detallan en la tabla 5.2.

Existe escasa información que permita la evaluación de los índices de asimilación de PICs por plantas de cultivo. Al igual que los metales, tanto la deposición de los PICs sobre la superficie de la planta como su tasa de asimilación juegan un papel importante en el grado de exposición humana.

Tabla 5.2
TASA DE ASIMILACION DE METALES PESADOS POR PLANTAS DE CULTIVO

Metal	Porcentaje de Asimilación	
	Porción Vegetativa	Porción reproductivo
Arsénico	4	0,6
Cadmio	55	15
Cromo	0,75	0,45
Mercurio	90	20
Plomo	4,5	0,9
Niquel	6	6
Berilio	1	0,15

Fuente: Baes 1984, citado por Stein 1990.

Tasa de asimilación = concentración en el vegetal/concentración en el suelo * 100

Las dioxinas muestran una limitada tendencia a pasar del suelo a los cultivos. Un estudio de la literatura disponible afirma:

"Existe evidencia de que las plantas absorben el 2,3,7,8-TCDD de los suelos contaminados, pero la cantidad asimilada y el mecanismo de transporte dentro de la planta (hacia las partes comestibles, por ejemplo), no están claros. Los cálculos, suponiendo el peor caso posible (utilizando la tasa de asimilación suelo - planta más elevada que se cita en la literatura), dan como resultado índices de exposición muy altos, comparables a los de cualquier otra vía de exposición" [USEPA 1990].

En una evaluación del índice de exposición a los contaminantes emitidos por un horno rotatorio, en la que se revisaron los datos disponibles sobre asimilación de dioxinas por las plantas de cultivo, se llegó a la conclusión de que la concentración de dioxinas y furanos en las mismas podía estimarse, de forma conservadora, en un 10 % de la concentración de estas sustancias presentes en el suelo [Stein 1990]. Los

autores concluyeron que la contaminación por dioxinas en los cultivos correspondía por lo menos al 4 % de la exposición total humana a las dioxinas y furanos generados por el horno rotatorio. [Stein 1990]

Se cree que también otros PICs son asimilados por las plantas. En la evaluación del horno rotatorio de residuos se concluyó que *"pueden existir mecanismos de transporte activo dentro de las plantas"* de hidrocarburos aromáticos polinucleados (PAHs). Dicho informe observaba que *"un estudio menciona la asimilación de 17 PAHs distintos en cebollas, remolachas y tomates"*, y que otro informaba de *"niveles consistentemente elevados de PAHs en aquellas plantas cultivadas en terrenos abonados o mezclados con sedimentos de aguas residuales"*, aunque la acumulación en los cultivos de dicho estudio puede deberse a una deposición desde la atmósfera más que a una asimilación desde el suelo. Los autores concluyeron que una correcta estimación del nivel de PAHs existentes en los cultivos sería de un 10 por cien de la concentración existente en el suelo. El estudio indicaba, asimismo, que la ingestión de contaminantes a través de cultivos contaminados, por asimilación o deposición desde la atmósfera, representaba el 46 % de la exposición total a los PAHs generados por la incineradora [Stein 1990].

Exposición a través de la leche, carne y huevos

No existen datos que permitan la cuantificación de la tasa de incorporación de PICs y metales presentes en el suelo y forrajes a la leche y los huevos. En Europa y los EEUU, la ingestión de productos lácteos se considera como una de las vías principales de exposición a los PCDDs y PCDFs, con dosis diarias que superan unas 12 veces las de la inhalación [Travis 1989]

Según un estudio de la literatura disponible acerca de la exposición a dioxinas:

"...se ha demostrado que, tras su administración en la dieta o la ingestión de suelos contaminados, el ganado vacuno de leche y carne, acumula niveles importantes de 2,3,7,8-TCDD y otros compuestos de estructura similar, como los PCBs, DDT, PBBs [USEPA 1988a]. Dado que las dioxinas y furanos se concentran en los tejidos grasos, deben esperarse cantidades detectables de estos contaminantes en la leche y carne del ganado vacuno que pascen en zonas contaminadas". [USEPA 1988a]

Según un estudio canadiense, el 93,1% de la ingestión de dioxinas por la población canadiense se realiza a través de los alimentos. En este estudio, que incluía también un análisis de los hábitos alimentarios, se encontró que los productos de origen animal contribuían en más del 98% a la ingestión total de dioxinas en la dieta, con las siguientes contribuciones específicas: productos lácteos 53,3 %; huevos 18,4 %; carne vacuna 17,8 %; y aves 8,6 %. Este informe apuntaba a la respiración como la segunda vía más importante de exposición a las dioxinas, contribuyendo a la misma en un 4,3 % del total [OMAF 1988].

En Suiza, se ha encontrado que la leche de las vacas que pastan cerca de incineradoras municipales de residuos contiene niveles de dioxina hasta 10 veces superiores a los encontrados en la leche de aquellas criadas lejos de estas instalaciones [Rappe 1987]. Otras sustancias contaminantes, como el hexaclorobenceno, han mostrado también cierta tendencia a acumularse en los productos lácteos de aquellas vacas criadas en zonas próximas a industrias que utilizan cloro [Rape 1987]. Asimismo, en Holanda se han documentado niveles elevados de PCDD en la leche de las vacas alimentadas cerca de incineradores de basuras [MPH 1989].

Los metales también pueden pasar a los productos lácteos, pero normalmente en concentraciones menores que las correspondientes a los hidrocarburos complejos. Un estudio sobre la exposición a contaminantes en un horno rotatorio de cemento situado en una zona rural concluye que la ingestión de leche y carne contribuye en un 14 % a la exposición total de mercurio y talio y en un 12 % a la de hierro y selenio. [Stein 1990]

Tabla 5.3
**VÍAS DE EXPOSICIÓN A LAS EMISIONES DE UNA INCINERADORA EN UNA
 ZONA RURAL**

Porcentajes de la exposición total

Contaminante	Inhalación	Ingestión	Vegetal	Pescado	Carne/Lácteos
Arsénico	71	4	20	4	2
Bario	17	7	73	4	1
Berilio	53	25	19	1	<<1
Cadmio	44	<<1	55	<<1	<<1
Cromo	85	2	11	1	<<1
Hierro	47	18	12	11	12
Mercurio	4	<<1	55	26	14
Niquel	38	2	59	<<1	<<1
Plomo	51	22	25	3	<<1
Selenio	62	3	23	<<1	12
Talio	38	19	20	9	14
Zinc	2	<<1	94	<<1	3
PROMEDIO	43	9	39	5	5
PCDDs/PCDFs	14	0	4	49	34
PCBs	0	0	0	97	1
PAHs	36	10	46	1	4

Fuente: Stein 1990, evaluación de exposición en el escenario de un caso plausible con utilización de un combustible del 16 por ciento

La tabla 5.3 resume las vías estimadas de exposición en los alrededores de la instalación. Dicho estudio fue llevado a cabo en una zona con un reducido ecosistema de agua dulce, viéndose reducidas por ello las estimaciones de exposición debidas al consumo de pescado.

INCINERACION Y CONTAMINACION POR HALUROS DE CARBONO

"La combustión es la única fuente de suficiente importancia y ubicuidad para ser responsable de las PCDD y PCDF existentes en el tejido adiposo humano." [Eitzer 1986]

Debido a su persistencia, los PCDDs y PCDFs se encuentran en la actualidad dispersos por el aire, agua y suelos de todo el mundo, incluso en zonas lejanas al origen de dichos contaminantes. Una vez dispersos en el medio ambiente, éstos y otros contaminantes persistentes pueden permanecer intactos durante años, conservando toda su toxicidad. Por ejemplo, en un estudio se estima que la vida media del TCDD en el suelo es de unos 29 años [USEPA1988a]. Además, los PCDDs y PCDFs se hallan presentes en todos los eslabones de la cadena alimenticia, y en muchas especies, incluyendo al hombre [C. Travis 1989].

La presencia de contaminantes tales como los PCDDs, PCDFs, PCBs, clorobencenos y clorofenoles, y toda una gama de metanos, etanos y etilenos clorados, presentes en las emisiones de las incineradoras, ha sido detectada en los tejidos orgánicos de un amplio sector de la población de los EE.UU. [Staley 1986]. Muestras del tejido adiposo de la población sueca [Staley 1986], y de Vietnam del Sur [Commner], han revelado la presencia de toda una serie de PCDDs y PCDFs. Un ciudadano medio en los EE.UU. transporta actualmente en sus tejidos adiposos 1.178 partes por trillón (ppt) de dioxinas y furanos [C. Travis 1989], incluyendo al menos 6 ppt de TCDD [Staley 1986].

Las exposiciones medias calculadas sugieren que los ciudadanos de los países industrializados ingieren PCDDs y PCDFs en cantidades que son el equivalente tóxico a una dosis diaria de 98 picogramos de TCDD [C. Travis 1989]. Esta cantidad de TCDD, PCDDs y PCDFs aumenta el riesgo de cáncer a un 1 por 10.000

-índice 100 veces superior al índice legal estándar en los EE.UU. [C. Travis 1989]. Además, aumenta también la posibilidad, de forma sutil pero con amplia difusión, de aparición de defectos de nacimiento, inhibición inmunológica, y dificultades en el desarrollo.

Los niños que en periodo de lactancia ingieren PCDDs, PCDFs y otros haluros de carbono complejos a través de la leche materna, padecen posiblemente el más elevado nivel de exposición a estas sustancias. Se ha estimado que en tan solo un año de lactancia, un niño en los EE.UU. puede acumular 189 veces la dosis de PCDDs/PCDFs necesaria de por vida para suponer un riesgo de cáncer de un 1 por millón (Schechter 1987). Un muestreo de calidad de la leche materna en mujeres de la población ha revelado la presencia de niveles significativos de otros haluros de carbono, existentes en las emisiones de las incineradoras, incluidos los PCBs y el hexaclorobenceno [Jensen 1983, Jensen 1987].

Las incineradoras de residuos peligrosos son una fuente importante de haluros de carbono complejos al medio ambiente. La combustión de compuestos halocarbonados, y de compuestos que contengan carbono junto con otros que contengan halógenos -en incineradoras industriales, fundiciones de metales que queman compuestos clorados, y combustibles de automóviles con aditivos clorados puede ser la fuente principal de un conjunto de halocarburos complejos, los PCDDs y los PCDFs. Otras fuentes importantes son las fábricas de papel y celulosa, que utilizan cloro y compuestos clorados como agentes blanqueadores, así como la fabricación de ciertos pesticidas y productos químicos clorados [Costner 1989a].

Debido a la falta de datos referentes a las emisiones de dioxinas por las incineradoras de residuos peligrosos y otros dispositivos de combustión, es imposible evaluar con precisión el papel que juegan los distintos tipos de incineradoras en la producción global de haluros de carbono. Un estudio realizado en Dinamarca sobre dioxinas y furanos ha demostrado que la incineración de basuras principalmente se considera *"la fuente principal de contaminación por dioxinas"* en este país [DNEPA 1984]. El Ministerio del Medio Ambiente del Canadá ha llegado a una conclusión similar sobre el origen de los PCDDs y PCDFs en este país [Commoner 1987].

Un estudio sobre los distintos tipos de dioxinas y furanos acumulados en el medio ambiente de América del Norte sugiere que el esquema de distribución de las especies de dioxinas y furanos parece indicar que la incineración de residuos clorados es la principal causa de la presencia de estos compuestos en el medio ambiente y en los seres humanos:

"El esquema de distribución en los EE.UU. se debe probablemente a la combustión de combustibles clorados, seguida de la degradación preferente en la atmósfera de los compuestos menos clorados. Esto sugiere que la contaminación de Vietnam del Sur se deba probablemente a causas parecidas, añadiendo además el 2,3,7,8- TCDD del Agente Naranja ... Es probable que el origen de los PCDDs y PCDFs presentes en los tejidos adiposos de la población en los EE.UU. se deba a la incineración de combustibles clorados. Esta conclusión está corroborada por las observaciones del contenido de PCDDs y PCDFs en las capas de sedimentos de los Grandes Lagos." [Commoner 1987]

La presencia similar de compuestos del grupo de los PCDD/PCDF en los sedimentos de los Grandes Lagos que aparece únicamente en el material sedimentado posteriormente a 1940, fecha en que dió comienzo la producción e incineración de compuestos clorados a gran escala [Czuczwa 1986], confirma esta hipótesis. Un estudio de 1986 sobre dichos sedimentos detalla que *"el transporte atmosférico de las partículas originadas durante la combustión ha hecho de los PCDDs y PCDFs sustancias ubicuas en el medio ambiente... Probablemente, la fuente más importante de los PCDD y PCDF presentes en la atmósfera sea la combustión de residuos que contienen compuestos clorados."* [Czuczwa 1986].

El papel jugado por las incineradoras de residuos peligrosos en la contaminación global por PCDDs y PCDFs no ha podido cuantificarse, y la controversia sobre las contribuciones relativas de las distintas fuentes continúa [Hagenmeier 1987].

Las incineradoras parecen desempeñar, asimismo, un papel fundamental en la continua dispersión de los haluros de carbono prohibidos, los PCBs [Eklund 1988], y pueden ser también una causa importante de la

distribución global de hexaclorobenceno y otros compuestos relacionados con las dioxinas. Sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado ningún intento exhaustivo de cuantificar el papel de las incineradoras en la dispersión global de dichos contaminantes.

6.- REFERENCIAS

- * D. Adkins, "Blast Handled Well, DHEC Says", Rock Hills (SC) Herald, July 12, 1987, A:1.
- * R. Albert, testimony to U.S. House of Representatives, EPA exhibit 564 in re: Dow Chemical Company et al, EPA FIFRA Docket, 415 ff., cited in P. Merrell and C. Van Strum, No Margin Of Safety, (Greenpeace, Washington D.C., 1987) p. II-7.
- * S. Bayard, "Quantitative Implications of the Use of Different Extrapolation Procedures for Low-Dose Cancer Risk Estimates from Exposure to 2,3,7,8-TCDD", Appendix A to USEPA 1988b, cited in full below.
- * J. Bergstrom, "Forbraning av Miljofarligt Avfall vid Kommunekemi A/S, Nyborg, Danmark", Studsvik Energiteknik AB, 15 november 1983.
- * J. Boegel, "Assessment of Residues from Incineration of RCRA Wastes", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Thirteenth Annual Research Symposium, US EPA Hazardous Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, July 1987, EPA/600/9-87/015.
- * R. Bowman, S. Schantz, N. Weerashinge, M. Gross, and D. Barsotti, "Chronic Dietary Intake of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin at 5 or 25 Parts per trillion in the Monkey: TCDD Kinetics and Dose- Effect Estimate of reproductive Toxicity", Chemosphere, 18:243-252, 1989a.
- * R. Bowman, S. Schantz, N. Weerashinge, M. Gross, and D. Barsotti, "Behavioral Effects in Monkeys exposed to 2,3,7,8-TCDD Transmitted Maternally During Gestation and During Four Months of Nursing", Chemosphere, 18:235-252, 1989b.
- * D. Burmaster and R. Harris, "Groundwater Contamination, And Emerging Threat", Technology Review, July 1982.
- * California Air Resources Board, Evaluation of Combustion Process of Destruction of Organic Wastes -- General Portland, ARB--SS-87-02, October 1987.
- * G.J. Carroll, R.C. Thurnau, R.E. Mournighan, L.R. Waterland, J.W. Lee, D.J. Fournier, J.R., Partitioning of Metals in Rotary Kiln Incineration, PB90-132812, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, September 1989.
- * D. Chang, R. Mournighan, and G. Huffman, "Thermodynamic Analysis of Post-Flame Reactions Applied to Waste Combustion" in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Thirteenth Annual Research Symposium, USEPA Hazardous Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, July 1987, EPA/600/9-87/015.
- * D. Chang, M. Richards, and G. Huffman, "Studies of POHC DE During Simulated Atomization Failure in a Turbulent Flame Reactor", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Fourteenth Annual Research Symposium, EPA 600/9-88/021, July 1988.
- * W. Clark, W. Seeker, and C. Lee, "Engineering Analysis of Hazardouse Waste Incineration: Energy and mass Balance", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Twelfth Annual Research Symposium, USEPA, Hazardouse Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA 600/9-86/002, August 1986.
- * R. Clapp, B. Commoner, J. Constable, S. Epstein, P. Kahn, J. Olson, D. Ozonoff, Human Health Effects Associated with Exposure to Herbicides and/or Their Associated Contaminants, Chlorinated Dioxins--Agent Orange and the Vietnam Veteran: A Review of the Scientific Literature, Agent Orage Task Force with The American Legion, Vietnam Veterans of America, and the National Veterans Legal Sevices Project, Washington D.C., April 1988.
- * T. Colbom, A. Davidson, S. Green, R. Hodge, C Jackson, and R. Liroff, Great Lakes: Great Legacy? The Conservation Fundation and The Institute for Research on Public Policy, Baltimore, MD, 1990.
- * B. Commoner, T. Webster, et al, "The Origin and Health Risks of PCDD and PCDF", in Waste Managment & Research (1987), V:327-346.
- * R. Cook, "Incineration: Technology Versus Science?", proceeding of the Third Annual National Symposium on the

Incineration of March 1989.

* P. Costner, Halocarbons: Their Production, Uses and Impacts on Human Health and the Environment, Review draft, Greenpeace International, Washington D.C., October 1989.

* P. Costner and J. Thornton, The Mississippi River and the national Toxics Crisis, Greenpeace USA, Washington D.C., December 1989.

* J. Czuczwa and R. Hites, "Airbone dioxins and dibenzofurans: Sources and Fates", Environmental Science and Technology, 20:195, 1986.

* G. Davis, "Shifting the Burden Off the Land", in American's Future in Toxic Waste Management, eds. Davis and Piasecki (New York: Quorum Books, 1987).

* D. Day, L. Cox, and J. Peters, Evaluation of Hazardous Waste Incineration in an Aggregate Kiln: Florida Solite Corporation, PB85-189066, Monsanto Research Corp., Dayton, OH, prepared for USEPA, April 1985.

* B. Dellinger et al, PIC Formation Under Pyrolytic and Starved Air Conditions, USEPA, EPA/600/S2-86/006, July 1986.

* B. Dellinger, P. Taylor, D. Tiery, and J. Pan, C.C. Lee, "Pathways of PIC Formation in Hazardous Waste Incinerators", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Fourteenth Annual Research Symposium, EPA 600/9-88/021, July 1988.p.289.

* (DNEPA) Denmark National Environment Protection Agency (Miljostyrelsen), Environmental Report: Formation and Dispersion of Dioxins, Particuly in Connection with Combustion of Refuse, Copenhagen, December 1985.

* R. Dreisbach and W. Robertson, Handbook of Poisonings: Prevention, Diagnosis, and Treatment, Twelfth Edition (Los Altos: Appleton and Lang), 1987.

* G. Eklund, J. Pedersen, and B. Stromberg, "Methane, Hydrogen Chloride and Oxygen Form a Wide Range of Chlorinated Organic Species in the Temperature Range 400 C - 950 C", in Chemosphere, vol, 17, no.3 (1988)

* B. Eitzer and R. Hites, "Airbone Dioxins and Furans: Sources and Fates", Environmental Science and Technology, 20:1185, 1986.

* S. Epstein, M. Legator, W. Lijinski, "Statement on Administration Policies on Acceptable Risks of Cancer", Unpublished Letter, Chicago, IL, 1989.

* G. Fein, J. Jacobson, and P. Schwarz, Intrauterine Exposure of Humans to PCBs: Newborn Effects, report for the USEPA Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, Duluth, MN, EPA-600/3-84-060, May 1984.

* W. Gruber, "Siting Efforts for Hazardouse Waste Incinerators: A Summary of Progress, Capacity and Location", EI Digest, May 1990, pp. 18-24.

* H. Hagenmaier, H. Brunner, R. Haag, M. Kraft, and K. Lutzke, "Problems Associated with the Measurement of PCDD and PCDF Emissions from Waste Incineration Plants" in Waste Management and Research, (1987) 5:239-250.

* Gregory A. Holton, "Economic Risk Assessment of Facilities Burning Hazardous Materials", Proceedings of 81st APCA Annual meeting Exhibition, June 20-24, 1988, Dallas, Texas, as reviewed in "Economics of Onsite Incinerator Failure", Hazardous Waste Consultant, January/February 1989.

* G. Huffman and L. Staley, "The Formation of Products of Incomplete Combustion in Research Combustors", in Incineration and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Eleventh Annual Research Symposium, EPA/600/9-85/028, September 1985.

* J. Jacobson, S. Jacobon, and H. Humphrey, "Effects of In Utero Exposure to Polichlorinated Biphenyls and Related Contaminants on Cognitive Functioning in Young Children", Journal Pediatrics, 116:38-45, January 1990.

- * R.K.M. Jayanty, S.B. Tompkins, and G.B. Howe, Annual Report on Performance Audit results for POHC Testing During RCRA Trial Burns, EPA/600/S3-89/023, USEPA, Washington D.C., September 1989.
- * A. Jensen, "Chemicals Contaminants in Human Milk", Residue Reviews 89:1-128, 1983.
- * A. Jensen, "Polychlorobiphenyls, Polychlorodibenzo-p-dioxins, and Polychlorodibenzofurans in Human Milk Blood and Adipose Fat", 22 January 1987, unpublished report of the Working Group on Assessment of Health Hazards in Infants Associated with Exposure to PCBs, Dioxins, and Related Compounds in Human Milk, World Health Organization Regional Office for Europe, presented in exhibits to P. Merrell and C. Van Strum, "Greenpeace Comments on U.S. EPA Proposal to Amend Dioxin and Furan Policy", Greenpeace, Washington D.C., October 1988.
- * M. Kamrin, Toxicology: A Primer on Toxicology Principles and Applications, Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1988.
- * Kern Country Air Pollution Control District (KAPCD), "Compliance Test Review" for national Cement Company (Lebec, CA) internal compliance document, 4/26/89.
- * G. Kimmel, "Reproductive and Developmental Toxicity of 2,3,7,8-TCDD", Appendix C to USEPA 1988b, cited below.
- * L. Lave and A. Upton, Toxics, Chemical, Health and The Environment, The Johns Hopkins Press, Baltimore, 1987.
- * I. Licis and H. Mason, "Boilers Cofiring Hazardous Waste: Effects of Hysteresis on Performance Measurements", Waste Management, Vol. 9, pp. 101-108, 1989.
- * W. Linak, J. McSorley, J. Wendt, and J. Dunn, "Waste Characterization and The Generation of Transient Puffs in A Rotary Kiln Incinerator Simulator", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Thirteenth Annual Research Symposium, US EPA Hazardous Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, July 1987, EPA/600/9-87/015.
- * O. Lindqvist, "Fluxes of Mercury in the Swedish Environment: Contributions from Waste Incineration", Waste Management and Research, 4:35-44, 1986.
- * O. L. Lloyd, M. M. Lloyd, F.L.R. Williams, A. Lawson, "Twinning in Human Populations and in Cattle Exposed to Air Pollution from an Incinerator", British Journal of Medicine 1988; 45:556-560.
- * J. Long, "House Hearings Probe Problems of Hazardous Material Transportation", Chemical and Engineering News, v. 67, no. 30, 24 July 1989.
- * J. Luoma, Scientists are Unlocking Secrets of Dioxin's Devastating Power, The New York Times, 15 May 1990, page B:7.
- * H. Mason, J. Nicholson, R. DeRosie, C. Wolbach and I.J. Licis, "Pilot Scale Boiler Cofiring Tests to Investigate Nonsteady Effects", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Fourteenth Annual Research Symposium, US EPA, Cincinnati, OH, EPA/600/9-88/21, July 1988.
- * K. McGill, Executive Says Waste Processor Won't Close Without a Fight", Baton Rouge State-Times, 26 June 1989, p. 3B.
- * P. Merrell and C. Van Strum No Margin of Safety: A Preliminary Report on Dioxin Pollution and the Need for Emergency Action in the Pulp and Paper Industry, Greenpeace USA, Washington D.C., 1987.
- * (MPH) Ministry of Public Housing, Urban Planning and Environmental Management of the Kingdom of the Netherlands, "Air Pollution Aspects of Incineration Facilities for Household Waste and Comparable Commercial Waste", in Waste Not 76, November 1989.
- * P. Montague, "Incineration Worsens Landfill Hazards", Hazardous Waste News, no. 162, Environmental Research Foundation, Princeton, NJ, January 1990.
- * P. Montague, "Fine Particles", Hazardous Waste News, no. 131, Environmental Research Foundation, Princeton, NJ, June 1989.

- * R. Mournighan, and M. Brascome, Hazardous Waste Combustion in Cement and Lime Kilns, USEPA, Washington D.C., 1987, EPA/68-03-3149.
- * J. Mulholland, R. Srivastava, and J. Ryan, "The Role of Rogue Droplet Combustion in Hazardous Waste Incineration", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Twelfth Annual Research Symposium, US EPA Hazardous Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA 600/9-86/022, August 1986.
- * D. Murature, S. Tang, R. Dougherty, and G. Steinhardt, "Phthalate Esters and Semen Quality Parameters", Biomedical and Environmental Mass Spectrometry, 14:473-377, 1987, 1987.
- * B. Murphy and T. Mix, "Risks Associated with Waste Fuel Use in Cement Kilns", Environmental Progress, 3:1 (Feb 1984), pp. 64-70.
- * National Library of Medicine, Hazardous Substances Databank, on-line database, Bethesda, MD, June 1990.
- * H. Needleman, "The Persistent Threat of Lead: A Singular Opportunity", American Journal of Public Health 75:643-645, May 1989.
- * H. Needleman, "Lead Exposure and Human Health: Recent Data on an Ancient Problem", Technology Review, 82:39-45, 1980.
- * J. Nelson and H. Zenick, Effect of Trichloroethylene on Male Sexual Behaviour: Possible Opioid Role, US EPA, PB87-196796, Washington D.C., 1986.
- * (OMAF) Ontario Ministry of Agriculture and Food/Ontario Ministries of the Environment Toxics in Food Joint Steering Committee, Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans and Other Organochloride Contaminants in Food, Ontario, Canada, August 1988.
- * E. t. Oppelt, "Thermal Destruction of Hazardous Wastes", in Environmental Science and Technology, 22:4 (1988).
- * E. t. Oppelt, "Hazardous Waste Destruction", Environmental Science and Technology, Vol. 20, No4, (1986), pp. 312-8.
- * T. Petzinger and M. Muffett, "Plants that Incinerate Poisonous Wastes run Into Host of Problems", Wall Street Journal, August 26, 1985.
- * C. Rape, M. Nygren, and G. Lindstrom, "Polychlorinated Dibenzofurans and Dibenzo-p-dioxins and Other Chlorinated Contaminants in Cow Milk from Various Locations in Switzerland", Environmental Science and Technology, 21:964-970, 1987.
- * J. Rasmussen et. al, Kommunekemie: No Solution to the Hazardous Waste Problem, Greenpeace International, Copenhagen, June 1990.
- * "Reproductive Toxicity Review", in REPROTOX, database of the Reproductive Toxicology Center, Washington D.C., June 1989.
- * E. V. Robb, J. F. Mc Gaughey, A. L. Sykes, and D. E. Wagoner, Recovery of Principal Organic Hazardous Constituents and Products of Incomplete Combustion from a Volatile Organic Sampling Train, EPA/600/S-7-86/025, September (1986).
- * W. Sanjour, USEPA Office of Solid Waste and Emergency Response, memo and enclosures to M. Woodall, 10 May 1990, reprinted in "Rollins Hazardous Waste Incinerator at Alsen, Louisiana", Waste Not, Vol. 113, July 26, 1990 and in "ENSCO Incinerator, El Dorado, Arkansas", Waste Not, Vool. 112, July 19, 1990.
- * N. Sax and R. Lewis, Dangerous Properties of Industrial Materials, Van Nostrand Reinhold Publishers, New York, 1989.
- * S. Schantz, N. Laughlin, H. van Valkenberg and R. Bowman, "Maternal Care by Rhesus Monkeys of Infant Monkeys Exposed to Either Lead or 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin", Neurotoxicology 7:2:637-650, 1986.

- * A. Schchter and T. Gasiewicz, "Health Hazard Assessment of Chlorinated Dioxins and Dibenzofurans Contained in Human Milk", *Chemosphere* 16:2147-2154, 1987.
- * S. Senkan, "Thermal Destruction of Hazardous Wastes", in *Environmental Science and Technology*, (1988) 22:4, pp. 368-370.
- * D. Seyler et al, "Use of In Vitro Methods for Assessing Reproductive Toxicity of Dicholophenols, *Toxicology Letters*, 20:309-215, 1985.
- * B. Shane, "Human Reproductive Hazards, Evaluation and Chemical Etiology", *Environmental Science and Technology*, v. 23, pp. 10 ff. (1989).
- * B. Sonawane, R. Smialowicz, and R. Luebe, "Immunotoxicity of 2,3,7,8-7cdd: Review, Issues, and Uncertainties", Appendix E to USEPA 1988b, cited in full below.
- * S. Sorbo, T. Tchabanoglous, and Lucero, "Fate of Selected Metals and Emissions from a Sludge/Waste-paper Gasifier", USEPA, Washington D.C., EPA/600/S2-85/135, January 1986.
- * L. Staley, "Carbon Monoxide and DRE: How Well Do they Correlate?" L. J. Staley in *Incineration and Treatment of Hazardous Waste, Proceeding of the Eleventh Annual reserach Symposium*, USEPA, Cincinnati, OH, EPA/600/9-85/085, September 1985.
- * L. Staley, M. Richards, G. Huffman, and D.Chang, *Incinerator Operating Parameters Wich Correlate With Performance*, U.S. EPA Hazardouse Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, October 1986, EPA/600/2-86/091.
- * J. Stanley, *Broad Sacn Analysis of the Fy 1982 National Human Adipose Tissue Survey Specimens, Volume I -- Executive summary*, USEPA, Washington D.C., EPA/560-5-86-035, 1986.
- * D. Stein and J. Lowe, *Health Risk Assessment: Increased Liquid Waste Fuel Firing in the Lebec Cement Kiln, Volume I: Report EBASCO Environmental with Dames & Moore*, prepared for National Cement Company, Lebec, CA, Revised April 1990.
- * G. Streisinger, direct testimony, EPA exhibit 564, in re: *The Dow Chemical Company, et al.*, USEPA FIFRA Docket 415 ff, 1980, in P. Merrell 1987, op cit.
- * Systech Environmetal Corporation, non-point air emissions estimates for 1987 from national cement Company, Lebec, CA, in *Toxics Release Inventory, on-line database of the National Library of Medicine*, Bethesda, MD, 1990.
- * J. Tessitore, J. Pinion. and D. DeCresie, "Thermal Destruction of Organic Air Toxics", *Pollution Engineering*, vol. 22, no. 3, March 1990.
- * A. Travis, "Waste Incineration Linked to Cancer", *The Guardian*, January 6, 1989.
- * C. Travis et al., *Inhalation Pathway Risk Aassessment of Hazardous Waste Incineration Facilities*, ORNL7TM-9096, October 1984.
- * A. Trenholm, P. Gorman, and G. Junclaus, *Performance Evaluation of Full-Scale Hazardous Waste Incinerators, Vol. I: Executive Summary*, US EPA, EPA-600/2-84-181a, November 1984.
- * A. Trenholm and C.C. Lee, "Analysis of PIC and Total Mass Emissions from An Incinerator", in *Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Twelfth Annual Research Symposium*, USEPA, Hazardouse Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA 600/9-86/022, August 1986.
- * A. Trenholm and R. Thurnau, "Total Mass Emissions from A Hazardous Incinerator", in *Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Thirteenth Annual Research Symposium*, USEPA Hazardous Waste Engineering Laboratory, Cincinnati, July 1987, EPA/600/9-87/015.
- * A. Trenholm et al., *Measurements of Particulates, Metals, and Organics at a Hazardous Waste Incinerator, Draft Final Report*, EPA 69-01-7287, Washington D.C., November 1988.

- * R. Turner, R. Hoye, and Fred Hall, "Hazardous waste Incineration Prior to Land Disposal", in Land Disposal, Remedial Action, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste, Proceedings of the Fourteenth Annual Research Symposium, EPA 60079-88/021, July 1988.
- * U.K. Department of the Environment, Dioxins in the Environment, Pollution Paper no. 27, HMSO London, 1989.
- * U.S. EPA Science Advisory Board, Report on the Incineration of Liquid Hazardous Waste by the Environmental Effects, Transport, and Fate Committee, Science Advisory Board, Washington D.C., April 1985a.
- * U.S. EPA, health Assessment Document for Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins, Washington D.C., EPA/600/8-84-014f, September 1985b.
- * U.S. EPA, Work/Quality Assurance Project Plan for the Bioaccumulation Study, Office of Water Regulations and Standards, Washington D.C., September 1985c.
- * U.S. EPA, Summary Report: Dioxin Analysis of Philadelphia Northwest Incinerator, Region 3 Headquarters, Philadelphia, PA, January 1986a.
- * U.S. EPA, Report to Congress on the Discharge of Hazardous Waste to Publicly Owned Treatment Works, Washington D.C., EPA/530-SW-86-004, 1986b.
- * U.S. EPA, National Dioxin Study: Report to Congress, US EPA Office of Air Quality Planning and Standards, Washington D.C., EPA/530-SW-87-025, 1987a.
- * U.S. EPA, National Dioxin Study Tier 4 -- Combustion Sources: Initial Literature Review and Testing Options, US EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Washington D.C., EPA/450/4-84-014b 1987b.
- * U.S. EPA, National Dioxin Study Tier 4 -- Combustion Sources: Engineering Analysis Report, Office of Air Quality Planning and Standards, Washington D.C., 450-84-014h, 1987c.
- * U.S. EPA, Estimating Exposures to 2,3,7,8-TCDD, External Review Draft, Washington D.C. EPA/600/6-887005a, June 1988a.
- * U.S. EPA, A Cancer-Risk Specific Dose for 2,3,7,8-TCDD, External Review Draft, Washington D.C. EPA/600-6-88-007A, June 1988b.
- * U.S. EPA Science Advisory Board, Review of OSW's Proposed Controls for Hazards Waste Incinerators: Products of Incomplete Combustion, Washington D.C., October 1989a.
- * U.S. EPA, Background Document for The Development of PIC Regulations From Hazardous Waste Incinerators, Draft Final Report, Office of Solid Waste, Washington D.C., October 1989b.
- * U.S. EPA, "Standards of Owners and Operators of Hazardous Waste Incinerators and Burning Of Hazardous Waste in Boilers and Industrial Furnaces; Proposed and Supplemental Proposed Rule, Technical Corrections, and Request for Comments", 55 Federal Register 82 April 27, 1990.
- * U.S. International Trade Commission, Synthetic Organic Chemicals: United States Productions and Sales, 1987, USITC Publication 2118, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., September 1988.
- * U.S. Office of Technology Assessment, Transportation of Hazardous Materials, Washington D.C., NTIS7PB87-100319, July 1986.
- * U.S. Office of Technology Assessment, Waste in Marine Environments, Washington D.C., OTA-O-334, April 1987.
- * U.S. Office of Technology Assessment, Neurotoxicity: Identifying and Controlling Poisons of the Nervous System, Washington D.C., OTA-BA-436, April 1990.
- * D. Van Buren, G. Poe, C. Castaldini, "Characterization of Hazardous Waste Incineration Residuals", in Incineration and Treatment of Hazardous Waste, Proceeding of Eleventh Annual Research Symposium, U.S. EPA, Cincinnati, OH, EPA/600/9-85/028, September 1985.

* D. Van Buren, G. Poe, C. Castaldini, "Characterization of Hazardous Waste Incineration Residuals", EPA/600/S2-87/017, May 1987.

* T. Webster, "Why Dioxins and Other Halogenated Hydrocarbons are Bad News", Journal of Pesticide Reform v.9, no. 4, pp. 32-35, Winter 1990.

* J. F. Welch and V. F. Baston, Propagation of Error in the Analysis of the Performance of an Incinerator, Physical Science, Inc.: Sun Valley, ID, 1986.

* R. Yang, E. Rauckman, "Toxicological Studies of Chemicals Mixtures of Environmental Concern at the National Toxicology Program: health Effects of Groundwater Contaminants", Toxicology, 47:14-34, 1987.

GREENPEACE

Greenpeace Cono Sur
Calle Lucio N. Mansilla 3046
(1425) Buenos Aires
Argentina
Tel/fax: 962 0404
e-mail: GP@WAMANI.APC.ORG