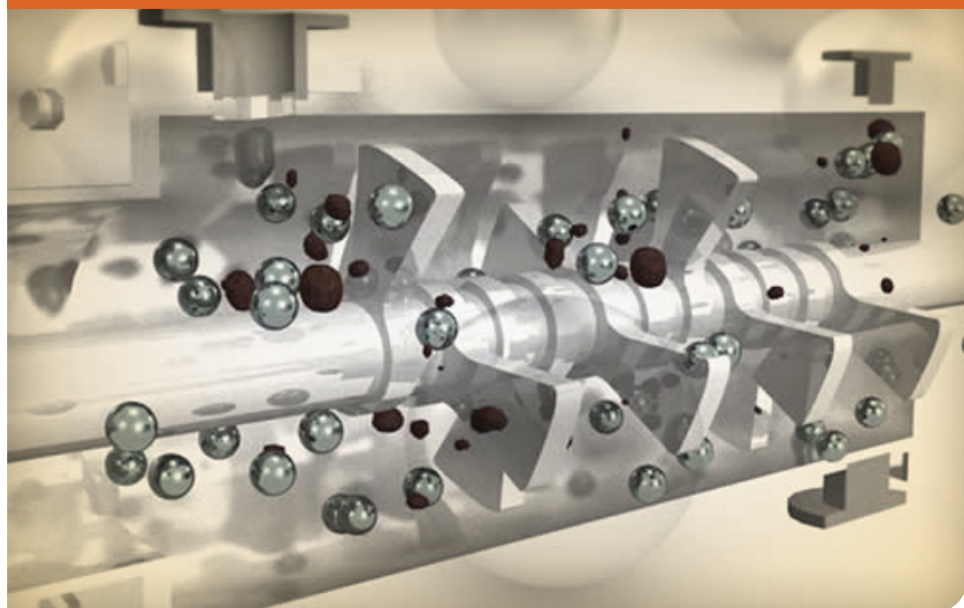




# LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA LA DESTRUCCIÓN DE DESECHOS DE COP

EL REEMPLAZO DE LA INCINERACIÓN POR TECNOLOGÍA LIMPIA

Abril de 2021



# LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA LA DESTRUCCIÓN DE DESECHOS DE COP

*Autor principal*

**Lee Bell**

*Asesor en políticas sobre el mercurio y los COP, IPEN*

**ABRIL DE 2021**



por un futuro sin tóxicos

**IPEN** (Red Internacional de Eliminación de Contaminantes) es una red de más de 600 organizaciones no gubernamentales que trabajan en más de 120 países para reducir y eliminar los daños a la salud humana y al medio ambiente producidos por sustancias químicas tóxicas.

[www.ipen.org](http://www.ipen.org)

ISBN: 978-1-955400-01-5

© 2021, Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (International Pollutants Elimination Network). Todos los derechos reservados.

Equipo de producción de IPEN: Bjorn Beeler, Tim Warner, Betty Wahlund

Citar esta publicación como:

Bell, L. *Las tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de desechos de COP: El reemplazo de la incineración por tecnología limpia*. Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN), abril de 2021.

A IPEN le gustaría agradecer el financiamiento del Gobierno de Suecia y otros donantes que hizo posible la producción de este documento. Los puntos de vista aquí vertidos no necesariamente reflejan la opinión oficial de los donantes.

**Foto de la portada:** (arriba) **ecoSPEARS**, (bottom) **Tecnología de destrucción mecanoquímica (MCD)**, **EDL Europa**.

# CONTENIDOS

<b>Resumen ejecutivo.....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>1. La destrucción de desechos de COP.....</b>	<b>10</b>
1.1 ¿Por qué se deben destruir los COP? .....	10
1.2 Las Mejores Técnicas Disponibles y las Mejores Prácticas Ambientales (MTD y MPA) .....	16
1.3 ¿Qué es la Eficiencia de Destrucción (ED) y los Niveles de Bajo Contenido de COP? .....	18
¿Qué son los niveles bajos de contenido de COP?.....	20
1.4 ¿Qué son las tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de desechos de COP? .....	21
<b>2. Qué es la tecnología de la combustión y porqué se le debe evitar .....</b>	<b>23</b>
2.1 La incineración de desechos .....	23
2.2 Los incineradores de residuos sólidos municipales .....	25
2.2.1 El ‘rediseño de identidad’ de los incineradores de desechos .....	26
2.2.2 El Etiquetado de ‘Conversión de Desechos en Energía’ .....	27
2.2.3 ¿Es Renovable la Energía Proveniente de la Incineración de Desechos?.....	29
2.3 Incineradores para residuos médicos .....	33
2.4 Incineradores de desechos peligrosos .....	33
<b>3. Las tecnologías alternativas a la combustión para existencias de COP y sitios contaminados.....</b>	<b>35</b>
3.1 Molienda de bolas (destrucción mecano-química).....	35
3.2 La Reducción Química en Fase Gaseosa (RQFG).....	42
3.3 La oxidación en agua supercrítica (OASC) y la oxidación en agua supercrítica para su escalamiento industrial (OASCi) .....	48
3.4 La descomposición catalizada por base (DCB).....	50
3.5 La hidrogenación catalítica (HC) .....	53
3.6 La dechloración catalítica utilizando catalizadores de cobre (DCC) .....	54
3.7 La reducción con metales alcalinos (reducción con sodio) .....	56
3.8 La Tecnología de Electrones Solvatados (TES) .....	58
3.9 La oxidación electroquímica .....	59
3.9.1 CerOx .....	61
3.9.2 DE-FLUORO (AECOM).....	62

<b>4. Los trenes de tratamiento .....</b>	<b>68</b>
4.1 Caso 1: SPEARS y RIDS.....	68
Etapa 1.....	68
Etapa 2 .....	70
4.2 Caso 2: La Unidad de Desorción Térmica Indirecta (UDTI) y la Descomposición Catalizada por Bases (DCB) .....	70
Etapa 1.....	72
Etapa 2 .....	72
<b>5. Conclusión y recomendaciones .....</b>	<b>75</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>78</b>

# RESUMEN EJECUTIVO

Desde la década de los años noventa, se han estado desarrollando y comercializando tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de los desechos de los contaminantes orgánicos persistentes (COP). Estas tecnologías proporcionan una alternativa no contaminante efectiva a la incineración de desechos de los COP, una vieja tecnología que sigue liberando y emitiendo COP generados de forma no intencional (COPNI). La incineración se ha convertido en una trampa con un ciclo interminable de intentos por destruir los desechos de los COP, seguido de una mayor creación de COP generados de forma no intencional bajo la forma de dioxinas y furanos provenientes del proceso de combustión. Los procesos alternativos a la combustión pueden destruir los mismos desechos y nos permiten liberarnos de una vez por todas del ciclo de los COP.

Este informe subraya la importancia de las tecnologías que forman el sector de tecnologías alternativas a la combustión, su desarrollo, su capacidad para destruir los desechos de los COP y el potencial que tiene su uso en los países en desarrollo en los cuales se necesitan soluciones innovadoras, móviles y en pequeña escala.

Para explicar la importancia de las tecnologías alternativas a la combustión en una sociedad global que busca alcanzar metas sostenibles, es necesario explicar algunos de los marcos regulatorios internacionales en torno a los desechos de los COP, que se encuentran entre los desechos más peligrosos que se hayan generado. El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación, contienen elementos y directrices que definen y regulan los desechos de los COP, su destrucción y los requisitos técnicos para su tratamiento. Las directrices funcionan dentro de un marco compartido de políticas comúnmente conocidas como 'sinergias' entre los convenios, las cuales se explican en la sección 1.

La sección 2 del informe describe los problemas más significativos asociados con la incineración de desechos y el ciclo perpetuo de la incineración de desechos de COP y la subsiguiente generación de COPNI como las dioxinas, los furanos y los PCB similares a las dioxinas en las emisiones y los residuos sólidos del proceso. Entender los problemas de la incineración de desechos de COP resalta los beneficios de implementar una tecnología alternativa a la combustión.

La sección 3 del informe proporciona detalles de las tecnologías alternativas a la combustión que se utilizan más comúnmente para la destrucción de desechos de COP, incluyendo cualquier aplicación relevante para limpiar sitios contaminados. Puede resultar muy compleja la destrucción de los COP que están contaminando diferentes matrices ambientales, como la tierra y los sedimentos (así como escombros industriales y maquinaria) y se requiere de diferentes técnicas para destruir desechos de COP, como los plaguicidas obsoletos. La sección 4 describe el uso de *trenes de tratamiento* en los cuales se combinan dos o más tecnologías o técnicas de manera seriada para facilitar la destrucción de los COP que contengan los desechos.

En la sección final se proporcionan conclusiones y recomendaciones para resaltar la necesidad de contar con una comunidad internacional y gobiernos nacionales que formulen políticas y cooperen en la financiación y selección de tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de existencias de desechos de COP y la remediación de sitios contaminados con COP. Periódicamente se van añadiendo nuevos COP a los anexos del Convenio de Estocolmo para los cuales se requieren restricciones o prohibiciones y que finalmente deben ser destruidos. Muchas de estas sustancias químicas se encuentran presentes en bienes de consumo de uso común que en el futuro terminarán convertidos en existencias masivas de desechos de COP. Desde hace décadas que el mundo debería de haber estado destruyendo los desechos de COP viejos, como el PCB y sólo ha logrado lidiar con un porcentaje pequeño de los mismos. Sin la adopción generalizada de tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de desechos de COP, las existencias de nuevos desechos de COP se unirán a las existencias viejos y seguirán creciendo y envenenando el planeta. Este informe desglosa una gama de tecnologías alternativas que pueden permitir enfrentar este desafío sin causar una mayor contaminación con COP.

# INTRODUCCIÓN

Gracias al reconocimiento global de que los recursos son finitos y están desapareciendo, se han empezado a dar los primeros pasos tentativos para avanzar hacia el desarrollo de economías circulares. Un componente clave de una economía circular es la integración en la economía de recursos que anteriormente se consideraban ‘desechos’, para desplazar el uso de materiales vírgenes y los impactos ecológicos de su extracción. Para los gobiernos, las comunidades y el sector corporativo, los desechos y la manera en la que se les gestiona, se han convertido en un tema urgente relacionado con la formulación de políticas. Ya existe el reconocimiento de que la manera en la que la sociedad lidia con los desechos tiene graves implicaciones para el cambio climático, la salud del medio ambiente, la calidad del abastecimiento de agua y la salud de las generaciones actuales y futuras.

Entre los métodos tradicionales utilizados para lidiar con los desechos, han predominado el entierro o la incineración de materiales. Sin embargo, a lo largo del siglo XX, quedó claro que estos dos métodos para eliminar los desechos conducen a una contaminación descontrolada de la tierra, los mantos freáticos y la atmósfera, y que además se necesita recurrir a nuevas formas de reducir la contaminación. Esta situación se complicó con el conocimiento de que las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases producidos por la actividad humana estaban llevando hacia el calentamiento global y el cambio climático.

Incluso los métodos de incineración de desechos, a pesar de ser más sofisticados al recurrir a la combustión de los desechos en incineradores con filtros de emisiones, no logran controlar la emisión de gases de efecto invernadero. Durante el siglo XX, se dieron algunos avances en el control de contaminantes atmosféricos debidos a la incineración de desechos a través del diseño de mecanismos para reducir las emisiones de metales pesados, partículas y gases ácidos. Sin embargo, la incineración siempre ha estado asolada por el problema de las emisiones y liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes (COP). La toma de conciencia, en la década de los años ochenta, de que los incineradores son una fuente clave de emisiones altamente tóxicas de COP, como las dioxinas y los furanos (policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos o PCDD/PCDF), que se van acumulando en la cadena alimenticia y en el cuerpo humano, llevó a un aumento de los esfuerzos por reducir estas emisiones.

A pesar de haber invertido millones de dólares para evitar las emisiones de COP, la industria de los incineradores nunca ha logrado resolver este

problema. Haberle añadido a los incineradores equipos costosos de depuración de gases de combustión, además de otros equipos para el control de la contaminación atmosférica (APC por sus siglas en inglés), sí logró reducir de manera significativa la emisión de COP de transmisión aérea, aunque únicamente bajo condiciones de funcionamiento estable. Con gran frecuencia los incineradores de desechos se desestabilizan, les fallan los filtros, y sufren grandes fluctuaciones de temperatura durante el inicio y el apagado, lo cual conduce a niveles elevados de emisiones de COP. A estas condiciones se les denomina Condiciones de Funcionamiento Distintas de las Normales (OTNOC por sus siglas en inglés) y pueden ser responsables de altas emisiones de dioxinas que, por lo general, no se miden ni regulan (Arkenbout, 2018). Aunque se pudieran resolver estos problemas, aún así persiste el problema de las cenizas contaminadas. A través de aumentar la eficiencia del equipo de APC, los operadores de incineradores solo han logrado transferir los COP a las cenizas. Esto ha resultado en la generación de millones de toneladas de cenizas contaminadas con COP a nivel global, las cuales se introducen al medio ambiente y contaminan la cadena alimenticia (Petrlik y Bell, 2017).

Gran parte de los desechos que creamos se pueden reciclar, reutilizar, adaptar o bien compostear para contribuir a una economía circular. No es necesario enterrar o incinerar los desechos. Esto se aplica a la mayoría de los desechos orgánicos y del hogar y a gran parte de los desechos industriales y comerciales. Sin embargo, existen desechos que son extremadamente peligrosos que se deben destruir y no pueden entrar en la cadena de reciclado. Uno de los grupos de estos desechos son los desechos de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) que incluyen algunos plaguicidas, además de sustancias y productos químicos industriales a los que se les han añadido COP. Se trata de los compuestos más tóxicos que se hayan creado, muchos de los cuales los prohíbe el Convenio de Estocolmo, o bien restringe su uso<sup>1</sup>. No nada más son tóxicos, sino que son extremadamente persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan y viajan grandes distancias, atravesando las fronteras internacionales.

Este informe examina cómo destruir los desechos de COP sin recurrir a la incineración a través de utilizar técnicas y tecnologías alternativas a la combustión. Irónicamente, buscar destruir los desechos de los COP a través de la incineración resulta en la creación de COP generados de forma no intencional (COPNI) durante el proceso de combustión.

---

1 <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>



Los policlorodibenzodioxinas (PCDD) y policlorodibenzofuranos (PCDF), que más comúnmente se conocen como dioxinas y furanos, son los COP más tóxicos de un amplio rango de compuestos de COP que se emiten a la atmósfera o bien quedan atrapados en los residuos de los incineradores (las cenizas) cuando se incineran los COP. Al igual como en la actualidad existe una amplia aceptación de que la energía renovable tiene que reemplazar a los combustibles fósiles, así también ha llegado el momento en el que la sociedad debe reconocer que la incineración es una tecnología que conduce a un callejón sin salida ya que promueve la redistribución de los COPNI a través de las emisiones y la ceniza, la cual debe reemplazarse por una adopción generalizada de tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de COP.

A lo largo y ancho del mundo, existen comunidades que están luchando por evitar la instalación de incineradores de desechos que por décadas han estado contaminando el medio ambiente, absorbiendo grandes cantidades de capital e impidiendo el uso de prácticas más limpias y de mejor calidad para la gestión de desechos. Este informe explica por qué se debe ir eliminando gradualmente la incineración y detalla las tecnologías y técnicas alternativas a la combustión para destruir los desechos de COP y otros desechos peligrosos, interrumpiendo así el ciclo de contaminación causado por la incineración.

# 1. LA DESTRUCCIÓN DE DESECHOS DE COP

## 1.1 ¿POR QUÉ SE DEBEN DESTRUIR LOS COP?

La mayoría de los COP son sustancias químicas hechas por el hombre (aunque algunas dioxinas las generan volcanes) que reúnen ciertas características que exigen que se les destruya o bien que se les transforme de manera irreversible, para evitar impactos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente.

Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) son sustancias químicas orgánicas (con una estructura molecular basada en el carbono). Los COP se definen por las siguientes características: *“tienen propiedades tóxicas, son resistentes a la degradación, se bioacumulan y son transportados por el aire, el agua y las especies migratorias a través de las fronteras internacionales y depositados lejos del lugar de su liberación, acumulándose en ecosistemas terrestres y acuáticos”*.<sup>2</sup>

Esencialmente, los COP son compuestos químicos tóxicos y persistentes, difíciles de destruir y pueden ser perjudiciales para la salud humana, de las plantas y los animales y de los ecosistemas. Pueden ser particularmente problemáticos ya que son lipofílicos, es decir, son sustancias atraídas a los tejidos grasos en los organismos y se van acumulando con el tiempo. Además, se biomagnifican a través de los sistemas de la cadena alimenticia, resultando en concentraciones altas entre las especies con un nivel trófico más elevado, como los humanos, las orcas<sup>3</sup>, las ballenas, las águilas<sup>4</sup> y los delfines<sup>5</sup>. Como resultado de este elevado nivel de persistencia y

2 PNUMA (2009) Chapeau, Texto oficial del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, p 6.

3 Ross, P.S., Ellis, G.M., Ikonomou, M.G., Barret-Lennard, L.G. y Addison, R.F. (2000) High PCB Concentrations in Free-Ranging Pacific Killer Whales, *Orcinus orca*: Effects of Age, Sex and Dietary Preference. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 40, No. 6, pp. 504-515, 2000

4 Jaspers, V.L., Sonne, C., Soler-Rodriguez, F., Boertmann, D., Dietz, R., Eens, M., Rasmussen, L.M. y Covaci A. (2013) Persistent organic pollutants and methoxylated polybrominated diphenyl ethers in different tissues of white-tailed eagles (*Haliaeetus albicilla*) from West Greenland. *Environ Pollut.* 2013 Apr;175:137-46. doi: 10.1016/j.envpol.2012.12.023. Epub 31 de enero de 2013.

5 Jepson, P.D., Deaville, R., Barber, J.L., Aguilar, A., Borrell, A., Murphy, S., Barry, J., Brownlow, A., Barnett, J., Berrow, S., Cunningham, A.A., Davison, N.J., ten Doeschate, M., Esteban, R., Ferreira, M., Foote, A.D., Genov, T., Giménez, J., Loveridge, J., Llavona, A., Martin, V., Maxwell, D.L., Papachlimitzou, A., Penrose, R., Perkins, M.W., Smith, B., de Stephanis, R., Tregenza, N., Verborgh, P., Fernandez, A. y Law, R.J. (2016) PCB pollution continues to impact populations of orcas and other dolphins in European waters. *Scientific Reports Vol 6: 18573*

**TABLA 1.** ENLISTADO ACTUAL DE COP POR ANEXO EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO.

## ANEXO A (ELIMINACIÓN)

Las partes deben tomar medidas para **eliminar** la producción y el uso de las sustancias químicas incluidas en la lista del Anexo A. El Anexo incluye una lista de sustancias químicas cuyo uso o producción gozan de exenciones específicas que podrán ser ejercidas únicamente por las Partes que hayan registrado exenciones.

- |   |   |   |
|---|---|---|
| ● Aldrina   | ● ▲ Hexaclorobenceno (HCB)              | ▲ Parafinas cloradas de cadena corta (PCCC)               |
| ● Clordano  | ▲ Hexaclorobutadieno                    | ● Endosulfán de calidad técnica y sus isómeros conexos    |
| ● Clordecona  | ● Alfa-hexaclorociclohexano             | ▲ Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo |
| ▲ Éter de decabromodifenilo (mezcla comercial, c-decaBDE) | ● Beta-hexaclorociclohexano             | ● Toxafeno  |
| ● Dieldrina   | ● Lindano                               |   |
| ● Endrina   | ● Mirex                                 |   |
| ● Heptacloro  | ● ▲ Pentaclorobenceno                   |   |
| ▲ Hexabromobifenilo                                       | ● Pentaclorofenol y sus sales y ésteres |   |
| ▲ Hexabromociclododecano (HBCDD)                          | ▲ Bifenilos policlorados (PCB)          |   |
| ▲ Éter de hexabromodifenilo y éter de heptabromodifenilo  | ▲ Naftalenos policlorados               |   |
- Plaguicidas
  - ▲ Sustancias químicas industriales
  - Producción no intencional

## ANEXO B (RESTRICCIÓN)

Las Partes deben tomar medidas para **restringir** la producción y el uso de las sustancias químicas incluidas en la lista del Anexo B a la luz de cualquier finalidad aceptable y/o exenciones específicas incluidas en la lista del Anexo, cuando corresponda.

- DDT
- Ácido sulfónico perfluorooctano (PFOS), sus sales y fluoruro de perfluorooctano sulfonilo

## ANEXO C (PRODUCCIÓN NO INTENCIONAL)

Las Partes deben tomar medidas para reducir las **liberaciones no intencionales** de sustancias químicas incluidas en la lista del Anexo C con el objetivo de lograr una continua reducción al mínimo y, donde sea factible, alcanzar el objetivo final de su eliminación.

- |                             |                                      |                           |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| ■ Hexaclorobenceno (HCB)    | ■ Bifenilos policlorados (PCB)       | ■ Naftalenos policlorados |
| ■ Hexaclorobutadieno (HCBD) | ■ Dibenzoparadióxinas (PCDD)         |                           |
| ■ Pentaclorobenceno         | ■ Dibenzofuranos policlorados (PCDF) |                           |

toxicidad, el Convenio de Estocolmo requiere que se someta a los COP incluidos en la lista del Anexo A del Convenio a su 'eliminación'. El artículo 6 I. (d) (ii) del Convenio específicamente estipula que cada parte:<sup>6</sup>

*“Adoptará las medidas adecuadas para que esos desechos, incluidos los productos y artículos, cuando se conviertan en desechos: ... Se eliminen de un modo tal que el contenido del contaminante orgánico persistente se destruya o se transforme en forma irreversiblemente de manera que no presenten las características de contaminante orgánico persistente...”*

Aquellos COP incluidos en la lista del Anexo B del Convenio están sujetos a 'restricciones', contando con estrictos controles regulatorios sobre su producción y uso. El Anexo C del Convenio incluye los COP generados de forma no intencional o COPNI. Se trata de COP generados de forma no intencional a través de procesos de producción química en tanto impurezas y contaminantes o bien que se emiten al aire y se liberan a la tierra o los cauces de agua a través de procesos de combustión, como la incineración de desechos, la producción de cemento y la metalurgia. Las dioxinas y los furanos (PCDD/DF) son los COPNI más comúnmente conocidos y se asocian fuertemente con la incineración de desechos.

Actualmente, no existen niveles seguros de dioxinas y la actual carga corporal de las dioxinas y las sustancias químicas similares a las dioxinas que se han encontrado en la población general de Estados Unidos se encuentran en o cerca de niveles asociados con efectos adversos sobre la salud<sup>7</sup>. La mayoría de los otros países industrializados presentan niveles similares de dioxinas en sus poblaciones.

El hecho de que la salud humana se encuentre en un punto crítico en términos de la cantidad de dioxinas acumuladas, hace que sea importante eliminar las fuentes existentes de dioxinas y de compuestos similares a las dioxinas y evitar la creación de nuevas fuentes de este compuesto altamente tóxico. A pesar de que la dioxina es el COP más tóxico que causa cáncer<sup>8</sup> que impacta los sistemas reproductores y endocrinos de los seres humanos,<sup>9</sup> muchos otros COP, como los PCB y aquellos incluidos en la tabla que aparece más adelante, tienen características de toxicidad similares.

6 A pesar de que históricamente Estados Unidos e Italia han sido productores importantes de algunos COP (como PCB), no son partes del Convenio de Estocolmo.

7 Mandal PK, Tomkins A, Mandal A y Duffy J. Environmental Dioxin Pollution and its Influence on the African Americans. *SM J Bioprocess Biotech.* 2017; 1(1): 1002.

8 Kogevinas, M. (2001) Human health effects of dioxins: cancer, reproductive and endocrine system effects. *Hum Reprod Update.* mayo-junio de 2001;7(3):331-9

9 Birnbaum, L.S., Staskal, D.F. y Diliberto, J.J. (2003) Health effects of polybrominated dibenzop-dioxins (PBDDs) and dibenzofurans (PBDFs). *Environment International.* Volume 29, Issue 6, September 2003, Pages 855-860

Aunque los procesos del Convenio de Estocolmo definen, evalúan y enumeran los COP que requieren una acción regulatoria global, no es el único instrumento multilateral que cubre este tema. El Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación entró en vigor en 1992, precediendo al Convenio de Estocolmo por 12 años. El Convenio de Basilea se negoció en respuesta al aumento del vertido de desechos peligrosos por parte de países desarrollados en países en desarrollo durante la década de los años ochenta y a los controles regulatorios más estrictos y los mayores costos de la gestión de contaminantes implementados en jurisdicciones industrialmente desarrolladas.

El Convenio de Basilea define un amplio espectro de desechos peligrosos e incluye protocolos para su movimiento a través de fronteras nacionales, incluyendo las reglas de la notificación y el consentimiento previo e informado. Las áreas clave del Convenio de Basilea que abordan cuestiones relacionadas con la gestión y la destrucción de COP, están definiendo los que son y los que no son desechos de COP a través de determinar los umbrales mínimos. El Convenio también ha desarrollado directrices para la gestión de los desechos individuales de COP. Históricamente, las directrices se enfocaban en los doce COP iniciales incluidos en los anexos del primer texto del Convenio que se acordó. Desde entonces, conforme se han ido agregando nuevos COP a los Anexos del Convenio, se han ido desarrollando y se siguen desarrollando nuevas directrices para cada uno de los nuevos COP o familias relacionadas de COP. Por ejemplo, en 2017, se publicó el texto *Directrices técnicas sobre la gestión ambientalmente racional de los desechos consistentes en hexaclorobutadieno, que lo contengan o estén contaminados con él*. En este caso, las directrices abordan cuestiones relativas a la gestión de hexaclorobutadieno, un COP individual. En otros casos, se abordan familias relacionadas de COP bajo una sola directriz como *Las directrices técnicas sobre la gestión ambientalmente racional de los desechos consistentes en PCB, PCT, PCN o PBB, incluyendo HBB, que los contengan o estén contaminados con ellos*.

Dentro de cada documento de directrices, se discuten cuestiones como la descripción técnica del compuesto químico, sus diferentes formas (incluyendo sus desechos), los usos que se le ha dado históricamente y su producción al lado de opciones para la gestión ambientalmente racional (GAR) para las existencias o el producto y los desechos. Se trata de una intersección clave con el Convenio de Estocolmo en tanto que grupos de expertos de ambos convenios buscan homologar las definiciones y definir las técnicas de GAR. Uno de los documentos más importantes en términos de este informe es *Directrices técnicas generales sobre la gestión ambientalmente racional de los desechos consistentes en contaminantes*

*orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos*,<sup>10</sup> también conocidos sencillamente como las Directrices técnicas generales de Basilea. Este documento es muy importante para la evaluación de las técnicas para destruir los COP ya que dedica el capítulo IV G a la eliminación ambientalmente racional de los COP. La tabla 4 del capítulo IV G proporciona una matriz de algunas de las tecnologías conocidas que destruyen COP y señala cuáles sin los COP que son capaces de destruir (en algunos casos puede que se trate de todos los COP en su conjunto)<sup>11</sup>. Sin embargo, esta tabla sigue excluyendo a un número de tecnologías alternativas a la combustión que se ha comprobado son efectivas para la destrucción de los desechos de los COP, detalladas en secciones subsiguientes de este informe.

Uno de los aspectos más controvertidos de la interacción o las ‘sinergias’ entre los Convenios de Basilea y de Estocolmo es que en su lista de tecnologías para la ‘destrucción ambientalmente racional’ de los desechos de los COP, las Directrices técnicas generales sobre los desechos de los COP del Convenio de Basilea incluyen la incineración (tanto de desechos peligrosos como de desechos sólidos ‘avanzados’). Esto contradice directamente la inclusión de la incineración de desechos como una de las fuentes primarias conocidas de dioxina en tanto COPNI. En la práctica, esto crea directrices que, por un lado, dicen que es aceptable quemar los desechos de los COP en incineradores a pesar de que esos mismos incineradores, a su vez, van a emitir COPNI por sus chimeneas y generar ceniza contaminada con COP. Esta situación ha surgido debido a la estrecha definición técnica de lo que es la destrucción de COP a través de la cual se evalúan las tecnologías utilizadas. En parte, dos de las mediciones clave que se utilizan para medir la destrucción de los COP permiten la inclusión de la incineración en las directrices a pesar de que generan COPNI. Las mediciones son: la eficiencia de destrucción (ED) y la eficiencia de destrucción y eliminación (EDE), las cuales se discuten más adelante. Sin embargo, estas dos mediciones se enfocan en los COP destruidos a través de un proceso, pero ignoran los COPNI que se generan. Los incineradores y otras tecnologías de combustión generan COPNI, mientras que las tecnologías alternativas a la combustión no generan cantidades significativas de COPNI. Cuando se evalúan ambos tipos de tecnologías para la destrucción de desechos de COP, las directrices técnicas generales se enfocan en la ED y la EDE, en vez de priorizar por las tecnologías que no generan COPNI en primera instancia. Un segundo aspecto importante de las directrices técnicas generales sobre desechos del Convenio de Basilea es que se establece un

10 Disponible junto con otros documentos de directrices sobre COP del Convenio de Basilea en <http://www.basel.int/Implementation/Publications/LatestTechnicalGuidelines/tabid/5875/Default.aspx>

11 Las Directrices (y la Tabla 4) se encuentran actualmente sometidas a revisión y ya se les han hecho un número de modificaciones en forma de borrador las cuales probablemente se adopten en la siguiente Conferencia de las Partes del Convenio de Basilea y, por lo tanto, están sujetas a cambios.

## Resumen de tecnologías para la destrucción y la transformación irreversible de COP en desechos.

Tecnología	COP									
	HBB	HBCD	HCBD	PCB	PCDD/ PCDF	PCN	PCP	Plaguicidas COP	PFOS	POP- BDE
Reducción con metal alcalino	ND	ND	ND	Sí	ND	ND	ND	Sí, para algunos plaguicidas: clordano, HCH	ND	ND*
Incineración avanzada de desechos sólidos (ASWI)	ND	Sí	ND	ND	ND	ND	Sí	ND	ND	
Descomposición catalizada por bases (DCB)	ND	ND	ND	Sí	Sí	ND	Sí	Sí, para algunos plaguicidas: clordano, HCH, DDT, HCB	ND	ND
Hidrodescloración catalítica (HDC)	ND	NA	ND	Sí	Sí	ND	ND	ND	NA	NA**
Co-incineración en hornos de cemento	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí, para todos los plaguicidas	Sí	Sí
Reducción química en fase gaseosa (RQFG)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí, para todos los plaguicidas	Sí	Sí
Incineración de desechos peligrosos	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí, para todos los plaguicidas	Sí	Sí
Arco de plasma	ND	ND	ND	Sí	ND	ND	ND	Sí, para la mayoría de los plaguicidas, incluyendo clordano, clordecona, DDT, endosulfán, heptacloro	ND	ND
Método de descomposición por fusión de plasma (PMD)	ND	ND	ND	Sí	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Oxidación en agua supercrítica (OASC)	ND	ND	ND	Sí	Sí, para PCDD	ND	ND	Sí, para algunos plaguicidas: clordano y DDT	ND	ND
Producción térmica y metalúrgica de metales	ND	ND	ND	ND	Sí	ND	ND	ND	ND	Sí

\* No determinado; \*\* No aplicable a este tipo de residuo; Fuente: Adaptado de las Directrices técnicas generales del Convenio de Basilea para el manejo ambientalmente racional de los desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos, 2020.

umbral límite para definir a cuáles desechos se les considera 'desechos de COP', con base en la concentración de COP que contengan y, por lo tanto, bajo el Convenio de Estocolmo están sujetos a requisitos obligatorios para su gestión (como la destrucción ambientalmente racional). Esta es un área clave de traslape entre los Convenios de Basilea y de Estocolmo y a estas relaciones entre los convenios se les conocen como '*sinergias*'. Al umbral en el cual se define un desecho contaminado con COP como desechos de COP (y no sólo un desecho general o peligroso) se le denomina niveles de bajo contenido de COP (NBCC o LPCL por sus siglas en inglés) y este umbral va variando según los diferentes tipos de COP.

Por ejemplo, los desechos contaminados con policloribifenilos (PCB) por encima de 50 mg/kg (50 partes por millón) son desechos de COP y se les debe destruir. Si el nivel de policloribifenilos en los desechos es de 49 mg/kg o menos, entonces no se les consideran desechos de COP (aunque igual podrán ser peligrosos) y se les debe gestionar bajo otros sistemas de gestión de desechos utilizados a nivel nacional o estatal en cualquier jurisdicción dada. Para los PCDD/DF, el NBCC actual es de 15 partes por cada mil millones o bien 15 ppb. Por lo tanto, a los desechos con una concentración de dioxinas por debajo de 15 ppb no se les considera 'desechos de COP'. La discusión sobre si son adecuados estos niveles de NBCC y se les debiera de reducir, es un debate continuo y periódicamente se revisan las directrices conforme van surgiendo nuevos resultados científicos sobre los impactos de los COP. Más adelante se proporcionan detalles sobre los NBCC.

Una vez identificados los desechos de los COP (con base al hecho de que exceden los NBCC) se les deberá destruir o bien transformar de manera irreversible para que dejen de mostrar características de COP. El Convenio de Estocolmo no aborda el tema de cómo hacer esto directamente, por lo que las directrices técnicas generales del Convenio de Basilea cubren esta función a través de enumerar las tecnologías de destrucción de COP y proporcionar detalles sobre los procesos. No obstante, la lista que proporcionan las directrices técnicas generales no es exhaustiva y existen otros métodos disponibles.

## 1.2 LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y LAS MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES (MTD Y MPA)

Existe una capa adicional de complejidad en términos de la interacción de los Convenios sobre la destrucción de los COP y se trata de la cuestión de las directrices para las Mejores Técnicas Disponibles y las Mejores Prácticas Ambientales (MTD MPA). Estas directrices se crearon en reconocimiento de que algunas tecnologías, como la incineración, emiten COPNI y se tienen que tomar medidas para reducirlos a un mínimo. El Convenio



de Estocolmo cuenta con sus propios grupos de expertos asesores, incluyendo el Grupo de Expertos del Kit de Herramientas para Dioxinas y MTD/MPA. Este grupo desarrolla directrices sobre los mejores métodos y técnicas para echar a andar procesos que se sabe que emiten COP generados de forma no intencional (COPNI) como las dioxinas, para así reducir esas emisiones y liberaciones. Estas directrices se conocen colectivamente como las Mejores Técnicas Disponibles y las Mejores Prácticas Ambientales (MTD MPA). El Kit de Herramientas para Dioxinas<sup>12</sup> es un instrumento guía asociado de gran utilidad que se utiliza para calcular las emisiones de PCDD/DF de una variedad de fuentes conocidas.

El Anexo C del Convenio de Estocolmo incluye los COPNI conocidos, así como las fuentes industriales que se sabe que son fuentes clave de COPNI e incluye:

- (a) Los incineradores de desechos, incluyendo los co-incineradores de desechos municipales, peligrosos o médicos o bien lodos de alcantarillado;
- (b) Hornos de cemento para la incineración de desechos peligrosos;
- (c) La producción de pulpa utilizando cloro elemental o bien sustancias químicas que generan cloro elemental para blanqueado;
- (d) Los siguientes procesos térmicos en la industria metalúrgica:
  - (i) La producción secundaria de cobre;
  - (ii) Plantas de sinterización en la industria del hierro y del acero;
  - (iii) La producción secundaria de aluminio;
  - (iv) La producción secundaria de zinc.

La mayoría de los documentos guía sobre MTD/MPA desarrollados por el Convenio de Estocolmo se relacionan con estas industrias y procesos de producción que utilizan ciertos COP de uso restringido. Conforme se le van agregando nuevos COP al Convenio de Estocolmo, se van desarrollando nuevas directrices sobre MTD/MPA para abordar cualquier sector nuevo que sea responsable de generar emisiones.

---

12 En la siguiente dirección, se puede acceder a un tutorial muy útil sobre cómo utilizar el Kit de herramientas para las dioxinas desarrollado por Pat Costner, miembro del Grupo de Expertos en MTD/MPA: <https://www.youtube.com/watch?v=hFMQwmKvIxQ>

### 1.3 ¿QUÉ ES LA EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN (ED) Y LOS NIVELES DE BAJO CONTENIDO DE COP?

Si un proveedor de tecnología argumenta que cuenta con una técnica o tecnología capaz de destruir o transformar desechos de COP de manera irreversible, de manera tal que ya no demuestre características de COP, entonces deberá poder medir y demostrar esta capacidad. La medición de esta capacidad también deberá ser transferible a otras tecnologías y técnicas para permitir una comparación del desempeño en una escala común. La forma primordial de medición que se utiliza es la Eficiencia de Destrucción (ED). La definición oficial de la ED es “*el porcentaje de COP que se destruyen o sufren una transformación irreversible al aplicarse un método o una tecnología específicos*”.<sup>13</sup>

Un nivel aceptable de ED, por lo general, se representa con los llamados ‘cinco nueves’ o 99.999%, lo cual significa que se ha destruido un 99.999% de los COP en una unidad de tratamiento de desechos. Un nivel de seis nueves o más, se considera que es un nivel de destrucción muy alto. La mayoría de las tecnologías alternativas a la combustión tiene una alta ED, pero la eficiencia puede variar y ser ligeramente más baja cuando se está lidiando con matrices ambientales complejas como tierras contaminadas impactados por múltiples contaminantes que podrían interferir con la técnica de destrucción utilizada.

La medición de la ED *no* refleja los COPNI generados a través de cualquier tecnología en el proceso de destruir los COP blanco en desechos. Por lo tanto, si se le introducen PCB a un incinerador que funciona según los requisitos de MTD/MPA, con la temperatura suficiente y en condiciones de funcionamiento óptimas y estables, se podrá lograr una destrucción de PCB con una ED de 99.999%. Sin embargo, en el cálculo de ED no se incluyen las dioxinas y los PCB similares a las dioxinas (dl-PCB), además de cualquier otro COPNI liberado a través de las emisiones y contenido en las cenizas residuales volantes y depositadas. Por lo tanto, la medición de la ED sólo se aplica a los niveles de destrucción de los insumos de desechos y no mide para nada los COPNI que se emiten y liberan en el proceso.

Esto significa que los niveles de ED atribuidos al tratamiento de los desechos de los COP por medio de incinerador no reflejan la ‘generación’ de COP adicionales creados y liberados al medio ambiente durante el proceso de incineración. Esto mismo se aplica a los desechos de los COP tratados en hornos de cemento, plantas metalúrgicas y otras formas de tecnología de combustión. No obstante, sigue siendo la única medición individual

<sup>13</sup> PNUMA (2019) Borrador de la actualización de las directrices técnicas generales sobre la gestión ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos.

más importante disponible para determinar si una tecnología puede destruir COP.

Una medición asociada es la Eficiencia de Destrucción y Eliminación (EDE), la cual muchas veces se utiliza en asociación con la incineración de desechos de COP (junto con otras tecnologías de combustión). Esta medición únicamente considera las emisiones a la atmósfera y es el porcentaje de los COP originales que se han transformado de manera irreversible y se han eliminado de las *emisiones gaseosas*. No considera ningún COPNI generado en el proceso de destrucción de los desechos de los COP y no proporciona una medición de la cantidad de los COP originales contenidos en los desechos se transfieren a los ‘residuos’ del proceso de combustión. Puede que una fracción significativa de los COP originales contenidos en los desechos tratados quede atrapada en el medio de depuración de gases de combustión (como el carbono activado), el equipo de gases de combustión (como los filtros mangas), los efluentes (como los depuradores húmedos por atomización), las cenizas residuales volantes o depositadas o bien incluso las tuberías de proceso.

Por esta razón, la EDE no es una medición exacta de la destrucción de los COP, su sola eliminación de las emisiones gaseosas deja un estado de incertidumbre acerca del futuro de los COP tratados y de los COPNI generados que el proceso de destrucción transfiere a los desechos sólidos o líquidos. A su vez, puede que se liberen estos desechos al medio ambiente y que finalmente se distribuya su contenido de COP en la cadena alimenticia (Petrlík y Bell, 2017).

Por último, en los casos en que exista una incertidumbre significativa con respecto a la eficiencia de destrucción de los COP en la tecnología de la combustión o en los que no se le pueda verificar con precisión, se permite la aplicación de los ‘niveles absolutos’ bajo las directrices técnicas generales del Convenio de Basilea<sup>14</sup>. Los niveles absolutos a los que se refieren las directrices corresponden a las emisiones atmosféricas, a los desechos líquidos y a los residuos sólidos provenientes de las instalaciones de combustión en los que se le aplica el tratamiento a los COP.

Las directrices para la emisiones atmosféricas, se relacionan exclusivamente a las dioxinas y los furanos y es 0.1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> PCDD/DF con la presuposición de que todos los demás COPNI habrán sido filtrados en suficiente medida por los dispositivos de control de la contaminación, para así reducir las emisiones a un nivel de riesgo aceptable. El umbral de 0.1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> PCDD/DF no incluye dioxinas como los PCB (dl-PCB)

---

<sup>14</sup> Ibid p. 15

o las dioxinas bromadas, cuyas emisiones no se encuentran actualmente reguladas, aunque muestran una toxicidad similar.

Para todos los demás COP y COPNI, depende esencialmente de las normas y lineamientos de la legislación nacional, las cuales pueden variar de manera dramática o bien ser inexistentes.

Para los desechos líquidos, cualesquiera de las partes puede revertir a las normas y lineamientos de su legislación nacional, lo cual permite que se den las mismas debilidades que las anteriormente mencionadas.

Para los residuos sólidos del proceso de combustión (las cenizas en el caso de la incineración, el polvo de los hornos de cemento y los residuos de escoria en el caso de las plantas metalúrgicas), los niveles remanentes de COP se deberán encontrar por debajo del umbral de “Bajo Contenido de COP” y estos niveles varían de un COP a otro.

### ***¿Qué son los niveles bajos de contenido de COP?***

Los niveles de bajo contenido de COP es el umbral del nivel de concentración de COP por encima del cual esos desechos se vuelven ‘desechos de COP’ y deberán recibir tratamiento para destruir el contenido de COP, tal cual lo requiere el artículo 6 del Convenio de Estocolmo. Si el desecho se somete a prueba y el contenido de COP está por debajo del nivel relevante de bajo contenido de COP, entonces no se les considera desechos de COP y no necesitan recibir tratamiento por parte de un equipo especializado en la destrucción de COP en los desechos.

Por ejemplo: si un incinerador está quemando desechos de PCB y las cenizas residuales que quedan contienen una concentración de dioxinas que exceda los niveles de bajo contenido de COP para las dioxinas y furanos (actualmente 15 ppb), en ese caso se podrían considerar las cenizas residuales como ‘desechos de COP’ y requerirían recibir tratamiento para destruir las dioxinas o reducirlas por debajo de una concentración de 15 ppb. El umbral actual de los niveles de bajo contenido de COP para los PCB es de 50 mg/kg. Si en un incinerador se quemaran desechos de PCB y las cenizas del incinerador al final del proceso tuvieran una concentración de PCB por encima de los 50 mg/kg, se les consideraría desechos de COP y se les debería aplicar un tratamiento para destruir los PCB o reducir la concentración de PCB por debajo de los 50 mg/kg.

El objetivo de asignar un umbral de concentración para clasificar ciertos desechos como ‘desechos de COP’ es asegurar que se proteja tanto la salud humana como la del medio ambiente contra estas sustancias a través de requerir que se les envíe a un tratamiento especializado que destruya su

contenido de COP –en línea con las obligaciones establecidas en el Convenio de Estocolmo. Sin embargo, la determinación de los niveles de bajo contenido de COP no siempre se basa en principios científicos y se decide por medio de negociaciones a través de procesos del Convenio de Basilea con la asesoría de grupos de expertos. Esta determinación está abierta a decisiones políticas influidas por el cabildeo realizado por parte de la industria. Si se establecen los niveles de bajo contenido de COP por encima del contenido promedio de los COP que generan, puede que algunas industrias se eviten el gasto de enviar sus desechos a un tratamiento de destrucción. Entre más alto sea el porcentaje de concentración establecido por el valor del bajo contenido de COP para un COP determinado, será más débil el control de esos desechos. Esto permite que los materiales de desecho con niveles inseguros de COP se introduzcan al medio ambiente e incluso que se comercialicen entre países para su uso en la construcción, el diseño de paisajes y la construcción de carreteras.

La mayoría de los expertos están de acuerdo en que un nivel de alrededor de 50 mg/kg es adecuado para la mayoría de los COP como nivel de bajo contenido de COP que protege la salud humana y el medio ambiente (con la excepción de la dioxina que es mucho más tóxica y actualmente tiene un límite de 15 ppb con un límite propuesto de 1 ppb). Sin embargo, propuestas recientes de NBCC para COP, como las parafinas cloradas de cadena corta (PCCC), se han elevado hasta 10,000 mg/kg, el hexabromociclododecano (HBCD) a 1000 mg/kg y mezclas de éteres de bifenilos polibromados (PBDE) a 1000 mg/kg como suma. Estudios sobre los niveles adecuados realizados por asesores expertos en el tema indican que son necesarios niveles mucho más bajos para proteger la salud humana y el medio ambiente. Algunos sectores de la industria argumentan que establecer niveles más estrictos (más bajos) de contenido de COP afectaría a la industria.

#### 1.4 ¿QUÉ SON LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA LA DESTRUCCIÓN DE DESECHOS DE COP?

En cierto sentido, las tecnologías alternativas a la combustión se definen más claramente por lo que no son. En otras palabras, las tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de desechos de COP es una definición demasiado amplia que abarca muchas tecnologías y técnicas *que sencillamente no involucran la combustión de los desechos*. Un elemento secundario de la definición es que no producen COP generados de forma no intencional o COPNI como dioxinas y furanos. Las principales tecnologías de ‘combustión’ que se han utilizado para tratar desechos de COP son los incineradores (incluyendo unidades de pirólisis y gasificación) y, en menor grado, los hornos de cemento (coprocesamiento), además de las plantas metalúrgicas y las fundiciones. Comparten las ca-

racterísticas de operaciones a temperaturas relativamente altas (>800oC) con la combustión directa o indirecta de combustibles y desechos y una propensión a liberar COPNI como dioxinas y furanos a través de emisiones, residuos sólidos como cenizas y en menor grado líquidos, como el agua de los depuradores. La incineración es la tecnología de combustión más común utilizada para el tratamiento de desechos de los COP y se le describe de manera más detallada más adelante.

Las tecnologías alternativas a la combustión muchas veces se basan en principios fisio-químicos que deshalogenan los desechos de los COP y descomponen la estructura química de los COP en compuestos mucho menos dañinos o incluso en sustancias no tóxicas y útiles, como el hidrógeno. Puede que utilicen combinaciones de calor, presión, oxidación química y catalizadores para alcanzar los objetivos del artículo 6 del Convenio de Estocolmo, que consisten en destruir o transformar de manera irreversible los desechos de los COP para que dejen de mostrar características de COP. Las tecnologías alternativas a la combustión también pueden adoptar la forma de ‘trenes de tratamiento’ en los cuales se utiliza una tecnología o técnica para extraer y concentrar los desechos de los COP antes de que se aplique una segunda tecnología o técnica para destruir el volumen más pequeño de desechos concentrados de COP. Se pueden utilizar otras formas de pre-tratamiento para preparar los desechos para la destrucción de sus contenidos de COP en una segunda etapa.

En los capítulos subsiguientes, se discutirán tecnologías y técnicas alternativas a la combustión individuales, incluyendo trenes de tratamiento y algunas aplicaciones para la remediación de sitios contaminados. El tratamiento de las existencias de desechos relativos y homogéneos de los COP muchas veces requiere de diferentes arreglos logísticos para el tratamiento de los desechos de los COP y de tierras contaminadas en sitios contaminados. Es probable que los sitios contaminados enfrenten problemas más complejos relacionados con la eliminación de la contaminación de los COP de las matrices ambientales como los mantos freáticos, los sedimentos o tierras que requieran de un pre-tratamiento adicional y métodos de concentración.

Antes de pasar a una descripción detallada de tecnologías alternativas a la combustión, es importante discutir por qué las tecnologías de combustión, en particular la incineración, al dejarnos atrapados en un ciclo de quemar COP, generando a su vez COPNI, socavan los objetivos del Convenio de Estocolmo relacionados con la eliminación de los COP.

## 2. QUÉ ES LA TECNOLOGÍA DE LA COMBUSTIÓN Y PORQUÉ SE LE DEBE EVITAR

Por lo general, se entiende la tecnología de combustión para el tratamiento de desechos de COP como la incineración, el co-procesamiento de hornos de cemento y ciertas formas de procesos metalúrgicos y de fundidoras que funcionan a altas temperaturas y se considera que tienen la capacidad de destruir los desechos de COP. El problema más común con su uso para el tratamiento de desechos de COP es que son fuente de creación y liberación de COPNI, ya sea a través de emisiones o de residuos de desechos sólidos como las cenizas volantes y depositadas (de los incineradores), el Polvo de los Hornos de Cemento (CKD por sus siglas en inglés) y las emisiones de partículas. En algunos casos, el mal funcionamiento de una instalación de combustión puede llevar a liberaciones directas de desechos de COP que supuestamente están recibiendo tratamiento, a través de la chimenea. Cuando esto ocurre, la contaminación del medio ambiente local que rodea a las instalaciones, puede resultar significativa e implicar altos costos de saneamiento. La siguiente sección proporciona una descripción de tecnologías de combustión comunes utilizadas para el tratamiento de los COP y el potencial que tienen para ser fuentes de COPNI y otras formas de contaminación.

### 2.1 LA INCINERACIÓN DE DESECHOS

En el Reino Unido se ha utilizado la incineración de desechos desde 1874, cuando la compañía Manlove, Alliott & Co. Ltd. en Nottingham construyó los primeros ‘destructoros’, mientras que en Estados Unidos se ha utilizado desde 1885<sup>15</sup> para eliminar desechos de una manera descrita como ‘controlada’. Se hace esta aclaración para distinguir la práctica de la incineración de desechos de la práctica de la ‘quema abierta’ o la quema no controlada de desechos que se sigue realizando en muchas partes del mundo, sobre todo en los países en desarrollo. El propósito primordial de la incineración de desechos en el siglo XIX e inicios del XX era evitar la propagación de enfermedades desde los vertederos a cielo abierto en las calles de las ciudades en donde escaseaban los espacios para enterrar desechos. Además

15 <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/basic.html>

de quemar desechos por razones sanitarias, los incineradores permitieron reducir el volumen total de desechos en alrededor de un 90% y el peso de los desechos incinerados en alrededor de un 70%. La fracción del 30% de desechos restantes después de la incineración son residuos sólidos o ceniza.

En los inicios del siglo XX, en algunos lugares se adaptaron las instalaciones para la incineración de desechos para poder proporcionar energía calorífica a las industrias adyacentes. Se trató de un subproducto benéfico que, a lo largo de décadas, se desarrolló al lado de una infraestructura para proporcionar calefacción en algunos países como Dinamarca y Suecia. Aprovechar la energía que de otra manera se liberaría a la atmósfera a través de chimeneas, resultó ser una manera de ahorrar gastos en un momento en el cual la calefacción municipal provenía del petróleo, el carbón o la leña.

En las últimas décadas, la industria de incineradores de desechos ha buscado despojarse del estigma asociado con la contaminación que genera a través de reposicionarse, dejando de nombrarse como una industria para la eliminación de desechos, para presentarse como una industria 'abastecedora de energía'. Con el reconocimiento global del cambio climático de origen antropogénico, la industria fue un paso más allá argumentando que genera energía 'verde' renovable. Parte de esta estrategia ha sido permitir que la industria de la incineración acceda a subsidios para energías renovables, créditos fiscales y beneficios conexos.

La realidad es que la energía generada por incineradores no es ni verde ni renovable. La mayor parte del valor calórico derivado de los desechos proviene de plásticos en el flujo de desechos, los cuales son de origen petroquímico. Quemar plásticos es básicamente un proceso de dos pasos para la quema de combustibles fósiles. En vez de recurrir a quemar petróleo líquido para generar energía, los incineradores de desechos utilizan petróleo bajo la forma sólida de plásticos en el flujo de desechos como combustible. Las problemáticas descritas anteriormente se aplican al sector de la industria más comúnmente conocido como la incineración de residuos sólidos municipales (RSM) desde fines del siglo XX y persistiendo en el XXI. Mientras que la incineración de RSM es la forma más común de incineración de desechos, la incineración de residuos médicos y la incineración de desechos peligrosos también representan una parte sustancial del sector de la industria de la incineración.

Este informe se enfoca principalmente en la industria de la incineración de desechos peligrosos debido al papel directo que desempeña en el tratamiento de desechos de COP. Sin embargo, hay un traslape considerable entre las industrias, debido a los motivos que se describen más adelante y



todos los sectores sufren los mismos problemas fundamentales de contaminación, en diferentes grados.

## 2.2 LOS INCINERADORES DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Los incineradores de RSM queman desechos de los hogares que recolectan los municipios, así como algunos desechos comerciales e industriales. Los desechos incluyen plásticos, papel, productos descartados de todo tipo, textiles y desechos orgánicos. Estos incineradores a gran escala muchas veces procesan cientos de miles de toneladas anuales y algunos generan calor para la producción de energía. Típicamente afirman que funcionan a temperaturas de alrededor de 850°C y se les utiliza para reducir el volumen total de los desechos sólidos para su eliminación en un 90% y para reducir su peso en un 70%. Por cada tonelada de desechos incinerados, se generan alrededor de unos 300 kilos de cenizas contaminadas.<sup>16</sup> De este total, alrededor de entre un 3 y un 5% son cenizas volantes, una forma de ceniza altamente tóxica que se recolecta a través del equipo de control de contaminación atmosférica (CCA) de los incineradores para evitar que se emita hacia la atmósfera. El otro 25% son cenizas depositadas, que son menos tóxicas, aunque contienen cantidades significativas de metales pesados y COP. Las emisiones aéreas típicas de los incineradores RSM incluyen, mas no se limitan a:

- dioxinas y furanos (dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados)
- dioxinas y furanos bromados (dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos polibromados)
- PCB similares a las dioxinas (dl-PCB)
- bifenilos policlorados (PCB)
- hidrocarburos poliaromáticos (PAH)
- ácido perfluorooctanoico (PFOA)
- ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS)
- ácido clorhídrico (HCl)
- óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)
- óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

<sup>16</sup> Kalogirou, E. (2012), The development of WtE as an integral part of the sustainable waste management worldwide, Congreso de Recuatt, Energía y Reciclado, Mataró (España), 4 de octubre de 2012.

- amoníaco (NH<sub>3</sub>)
- partículas PM 2.5 y PM 10
- nanopartículas<sup>17</sup>
- metales pesados

### **2.2.1 El 'rediseño de identidad' de los incineradores de desechos**

Durante las últimas dos décadas, la industria de incineración de desechos ha invertido una gran cantidad de tiempo y energía en buscar la manera de deshacerse de la percepción pública negativa causada por la contaminación que generan los incineradores y expandirse hacia mercados nuevos en diferentes países del mundo. Europa tiene una sobreoferta de su capacidad de incineración en muchas jurisdicciones como Alemania<sup>18</sup> y los mercados tradicionales de incineradores en Estados Unidos y Japón se han estancado, existiendo muy pocas propuestas nuevas de construir plantas. En los últimos 23 años, en Estados Unidos sólo se ha construido un incinerador nuevo.<sup>19</sup>

Esto ha obligado a la industria productora de incineradores a recurrir a las relaciones públicas para hacer un 'cambio de imagen' a través de la cual rara vez se menciona la palabra 'incinerador', habiendo sido reemplazada por términos como gasificación, pirólisis, arco de plasma y conversión de desechos en energía (WtE por sus siglas en inglés). Según la Unión Europea<sup>20</sup> y la Autoridad de Protección Ambiental de Estados Unidos,<sup>21</sup> todas estas tecnologías son tecnologías de incineración de desechos. La configuración de cada tecnología varía, pero en su formato de eliminación de desechos, todas están diseñadas en torno a la quema de desechos, ya sea en una etapa o dos. Todas estas tecnologías producen un perfil similar de contaminantes (aunque podrán variar las concentraciones) y generan desechos sólidos contaminados que pueden contaminar la cadena alimenticia.<sup>22</sup>

17 Una nanopartícula es una sub-clasificación de las partículas ultrafinas con un largo que es entre dos o tres dimensiones mayores que un 0.001 micrometro (1 nanómetro) y menores a alrededor de 0.1 micrometro (100 nanómetros).

18 NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V.- (2009), Waste incineration in Germany is growing unchecked - recycling is endangered, waste import becomes more attractive. Results from the study carried out by Prognos AG: "The Waste Market in Germany and Perspectives by 2020", 2009.

19 US Energy Information Administration (2016) Monthly Electric Generator Report. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25732>

20 Unión Europea (UE) Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos (Directiva de incineración de residuos)

21 U.S. Environmental Protection Agency, Title 40: Protection of Environment, Hazardous Waste Management System: General, subpart B-definitions, 260.10, vigente a partir del 5 de febrero de 2008.

22 Petrlik, J. y Bell, L. (2017) Toxic Ash Poisons Our Food Chain. International POPs Elimination Network (IPEN), Arnika Association (Czech Republic) and National Toxics Network (Australia). <http://www.ipen.org/news/toxic-ash-poisons-our-food-chain>

Aquellos que proponen el uso de incineradores también han buscado hacer una distinción entre los incineradores ‘viejos’ y las tecnologías ‘nuevas’. Esto forma parte de promover el argumento que los ambientalistas y las comunidades se están oponiendo a la ‘vieja tecnología contaminante’ que ha sido reemplazada por una ‘nueva tecnología limpia’. Sin embargo, todas las ‘nuevas’ tecnologías son variantes básicas de la incineración que han sufrido cambios incrementales a lo largo del tiempo. A pesar de los argumentos de quienes proponen el uso de incineradores modernos de que estos han ‘resuelto’ los problemas de emisión (sobre todo en relación a las dioxinas), la realidad es que siguen emitiendo dioxinas y furanos, a veces a niveles muy altos.

Mientras que las normas de calidad del aire más estrictas han forzado a los incineradores de desechos a aumentar los controles de la contaminación (sobre todo para las dioxinas), siguen siendo responsables de descargas de un amplio rango de contaminantes atmosféricos y de incidentes de liberación de dioxinas. La incineración de desechos sigue siendo una de las fuentes más altas de liberación de dioxinas a la atmósfera, lo cual se reconoce con su inclusión como fuente de dioxinas en el Anexo C (de COP no intencionales), Parte II del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Las mejoras a los controles de las emisiones a la atmósfera también han llevado a un nivel mucho elevado de contaminación de los residuos de los incineradores como las cenizas, los cuales se deben seguir enviando a rellenos sanitarios. Al aumentar la capacidad de los depuradores y filtros de los incineradores para capturar contaminantes tóxicos que de caso contrario terminarían liberados a la atmósfera, gran parte de los contaminantes de los COP se transfieren de la fase gaseosa o fase particulada a la fase sólida como cenizas y otro tipo de residuos.

### ***2.2.2 El Etiquetado de ‘Conversión de Desechos en Energía’***

Muchos países ya cuentan con regulaciones y políticas que ligan sus sistemas de gestión de desechos a una ‘jerarquía de los desechos’ que prioriza las acciones basadas en las prácticas más ecológicamente sostenibles (como evitar la generación de desechos) por encima de prácticas menos preferibles, como la eliminación de desechos (como los rellenos sanitarios y los incineradores).

Quienes proponen el uso de incineradores y buscan mejorar la percepción de la incineración de desechos causada por un registro deficiente de la trayectoria de la contaminación y su relegación a niveles inferiores de la jerarquía de los desechos, han utilizado la problemática del cambio climático para procurar mejorar sus prospectos. Entre los que proponen el uso de incineradores, pocos promueven esta tecnología como un medio

## THE ZERO WASTE HIERARCHY

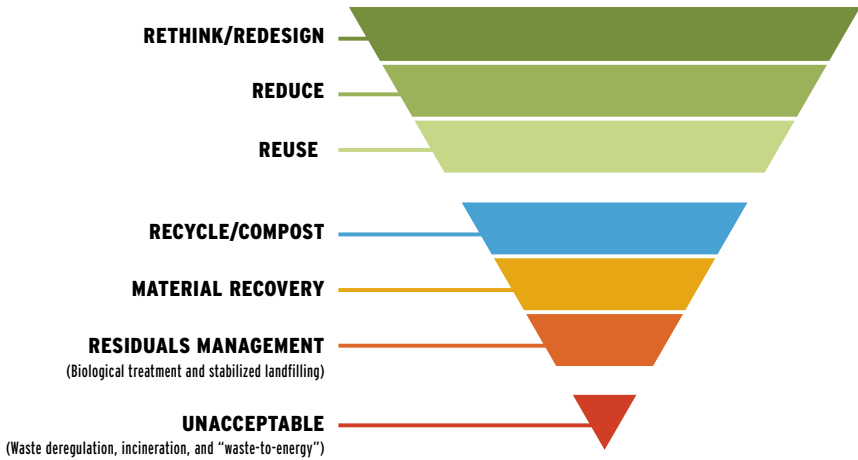


Figura 1. Jerarquía de cero residuos. Fuente: SCP/RAC 2020

para eliminar los desechos, sino que han puesto el énfasis en la cuestión de la generación de energía con base en la quema de desechos. En diversas formas, este nuevo concepto utilizado para publicitar los incineradores se expresa como: ‘energía proveniente de desechos (EfW)’, ‘conversión de desechos en energía (WtE)’, ‘recuperación de energía’ o ‘recuperación de recursos’.

Esta reorientación perceptual que busca alejarse de la visión tradicional de la eliminación de desechos, es un esfuerzo por crear un mercado para la incineración de desechos como parte de opciones provenientes de una ‘mezcla de energías renovables’ para combatir el cambio climático. Para quienes proponen el uso de incineradores, está incluido el beneficio adicional de permitirles buscar financiación, subsidios, créditos fiscales y otros tipos de apoyo financiero asignado para energías renovables. Al cambiar la identidad de la energía proveniente de la incineración para darle una fachada “verde”, también se apoyó el impulso para crear un nuevo nivel de las jerarquías de los desechos por encima de la ‘eliminación’ llamada ‘recuperación’, con lo cual se crea la impresión de que la incineración para convertir los desechos en energía era ‘superior’ a la tecnología para la eliminación de los desechos en rellenos sanitarios. En consecuencia, una falsa dicotomía ha dominado el debate sobre la gestión de los desechos en muchas jurisdicciones, en donde se comparan los méritos de

los rellenos sanitarios versus la incineración, excluyendo otras opciones.<sup>23</sup> En este debate orquestado, se puede declarar la incineración como una opción ‘superior’ porque se puede generar energía con base a la incineración de desechos.

### **2.2.3 ¿Es Renovable la Energía Proveniente de la Incineración de Desechos?**

La energía creada por medio de la incineración de desechos no es renovable, ni sostenible ni ‘verde’. Debido al alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de electricidad generada, incluso en comparación con la electricidad generada con carbón y centrales de producción eléctrica a base de petróleo, los incineradores de desechos contribuyen directamente al cambio climático. La incineración de desechos y los rellenos sanitarios representan los peores resultados, en términos de cambio climático, y de cómo lidiamos con nuestros recursos. Si fuéramos a desviar los desechos de los rellenos sanitarios y de la incineración hacia formas alternativas de recuperación de los recursos (reciclado, reutilización, composteo y digestión anaeróbica), aumentarían de manera significativa los beneficios en términos de paliar el cambio climático. Mientras que los incineradores emiten más contaminación por CO<sub>2</sub> que el carbón o las plantas térmicas<sup>24</sup>, quienes promueven el uso de incineradores siguen argumentando que la energía que generan es ‘amigable con el clima’.

A pesar de su desempeño deficiente, quienes proponen el uso de incineradores sostienen que los incineradores generan energía renovable y que son más amigables con el clima que los rellenos sanitarios. Sin embargo, el problema real para la medición del impacto sobre el cambio climático es qué tan bien se comparan los incineradores con otras fuentes de generación de energía, no con otras prácticas de gestión de desechos. Cuando se examina esta comparación, queda demostrado que las emisiones de GEI provenientes de los incineradores de desechos que generan electricidad son las más elevadas con respecto a todas las demás tecnologías.

Los desechos municipales mixtos son un combustible sucio y extremadamente heterogéneo con un bajo valor calórico cuando se les compara con los combustibles fósiles estándar utilizados para la generación de electricidad. En otros estudios, investigadores del Reino Unido han demostrado

---

23 ENDS Report (2020) Incineration vs landfill: Why the debate over carbon intensity is far from over. Octubre de 2020 [https://www.endsreport.com/article/1696759/incineration-vs-landfill-why-debate-carbon-intensity-far?bulletin=ends-report-products-chemicals-waste-resources-bulletin&utm\\_medium=EMAIL&utm\\_campaign=eNews%20Bulletin&utm\\_source=20201015&utm\\_content=ENDS%20Products%20Chemicals%20Waste%20and%20Resources%20\(39\)::&email\\_hash=](https://www.endsreport.com/article/1696759/incineration-vs-landfill-why-debate-carbon-intensity-far?bulletin=ends-report-products-chemicals-waste-resources-bulletin&utm_medium=EMAIL&utm_campaign=eNews%20Bulletin&utm_source=20201015&utm_content=ENDS%20Products%20Chemicals%20Waste%20and%20Resources%20(39)::&email_hash=)

24 U.S. EPA, eGRID 2000

que la incineración de los desechos emite hasta el doble de CO<sub>2</sub> que las centrales eléctricas de carbón por kilovatio-hora de electricidad.<sup>25</sup>

Cuando se les compara con fuentes de energía realmente renovable, como la energía eólica y la solar, el contraste se vuelve incluso más marcado. La tabla que sigue a continuación incluye factores relativos de emisión de GEI producidos por la incineración de desechos comparados con tanto fuentes de combustibles fósiles como con energía renovable basada en cálculos de la autoridad regulatoria de Estados Unidos. Queda claro que la incineración de desechos tiene las emisiones más altas de CO<sub>2</sub> de todas las fuentes. Sin embargo, quienes proponen el uso de incineradores argumentan que a pesar de los altos niveles de CO<sub>2</sub> por megavatio-hora emitidos, su tecnología sigue siendo amigable con el clima por que una fracción significativa de los desechos que queman provienen de materiales orgánicos, como papel, sobras de comida, desechos de madera, etcétera. Debido a que se trata de materiales orgánicos que se pueden seguir cultivando, la industria de los incineradores argumenta que la fracción 'biogénica' de sus combustibles (en contraposición a los materiales basados en petroquímicos que queman como los plásticos) resulta en la producción de energías renovables.

**TABLA 2.** CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SEGÚN LA FUENTE DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD (ESTADOS UNIDOS).

	CO <sub>2</sub> (lbs/MWh)	SO <sub>x</sub> (lbs/MWh)	NO <sub>x</sub> (lbs/MWh)
Incineradores de RSM	2988	0.8	5.4
Carbón	2249	13	6
Petróleo	1672	12	4
Gas natural	1135	0.1	1.7
Energía eólica	0	0	0
Energía geotérmica	0	0	0
Solar	0	0	0

Fuente: U.S. EPA, eGRID 2000 y U.S. EPA, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)*

Quienes proponen los incineradores, muchas veces señalan el decreto del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que excluye las emisiones de CO<sub>2</sub> biogénico provenientes de los 'desechos' en su protocolo para calcular los inventarios nacionales. Sin embargo,

<sup>25</sup> Hogg, D., (2006) "A Changing Climate for Energy from Waste?" *Economia Research and Consulting*. Mayo de 2006. p 21.

debido a que el propósito de las directrices del IPCC para calcular los inventarios nacionales es abordar todos los sectores de las emisiones de una nación, las emisiones biogénicas se contabilizan en otros sectores. Cuando se abordan las fuentes energéticas de un país, el IPCC de manera específica afirma que cuando se comparan fuentes de energía, se debe tomar en cuenta la fracción biogénica:

*“Las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la combustión de materiales de biomasa (como desechos de papel, alimentos y madera) contenidos en los desechos son emisiones biogénicas y no deberían incluirse entre los cálculos nacionales del total de emisiones. Sin embargo, si se utiliza la incineración de desechos para propósitos energéticos, se deberían calcular tanto las emisiones fósiles y las de CO<sub>2</sub> biogénico.... Más aún, si la combustión, o cualquier otro factor, está causando una reducción a largo plazo en el total del carbón inserto en la biomasa viva (como los bosques), esta liberación neta deberá ser evidente en el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> descritas en el Volumen 4 de las Directrices de 2006 sobre la Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra.”<sup>26</sup>*

Searchinger *et al.* (2009) revela que el hecho de que las reglas del inventario del carbono no contabilizan el CO<sub>2</sub> emitido por las chimeneas cuando se utiliza bioenergía es una falla grave de las reglas de IPCC que rigen el cálculo del carbono, al igual que no calculan los cambios en las emisiones procedentes del uso de la tierra cuando se cosecha o cultiva biomasa para la producción de energía. Searchinger hace notar que:

*“Este cálculo equivocadamente trata toda la bioenergía como carbono neutro, independientemente de la fuente de la biomasa, que puede causar grandes diferencias en las emisiones netas. Por ejemplo, la tala de bosques antiguos para la quema de madera o para desarrollar cultivos energéticos, se cuenta como una reducción del 100% en las emisiones de energía, a pesar de causar grandes liberaciones de carbono.”*

Además, está la cuestión del tiempo que se toma reemplazar los bosques que se convierten en papel, leña, astillas de madera, aserrín y productos de madera que terminan en incineradores. Un incinerador destruye de manera instantánea grandes cantidades de este recurso y lo convierte en liberaciones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y en cenizas contaminadas. Puede que

---

26 Institute for Global Environmental Strategies (IGES) (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>  
Incineration and Open Burning of Waste, Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Programme, p. 5.5, 2006.

se tome décadas, si no es que siglos, reemplazar árboles para que maduren y se conviertan en sumideros de carbono. La incineración de biomasa a gran escala, por lo tanto, agota las reservas de biomasa y libera carbono a una velocidad que va más allá del ritmo en el que la naturaleza puede renovar la biomasa y absorber el carbono, con lo cual contribuye al cambio climático a un ritmo cada vez más acelerado.

En el mejor de los casos, se podría considerar que una proporción muy pequeña del material biogénico destruido para la generación de energía en incineradores podría contribuir a la generación de energía renovable, sin embargo, otros estudios han demostrado que se pueden lograr resultados mucho mejores en términos de la sostenibilidad y el cambio climático a través de dirigir esos materiales orgánicos al compostaje y al procesamiento de otros materiales orgánicos. Los hallazgos de un importante análisis de este tema realizado por la Unión Europea concluyeron que: “La segregación de las fuentes de diferentes componentes de los desechos procedentes de los RSM [residuos sólidos municipales], seguida del reciclado o compostaje o digestión anaeróbica de putrescibles ofrece el flujo neto más bajo de gases de efecto invernadero bajo condiciones de referencia presu- puestas.”<sup>27</sup>

No se puede considerar que la gran mayoría de la energía generada a través de la incineración de RSM sea renovable, sobre todo por la dependencia de los incineradores de los RSM de los plásticos con un alto valor calórico que básicamente son una forma sólida de combustible fósil petro- químico. Ciertamente no se puede considerar que sea una fuente de energía limpia cuando se le compara con energías renovables o incluso con otras formas de generación de combustibles fósiles. Cuando se compara la destrucción de recursos y de la energía inserta en ellos en la generación de energía procedente de la incineración de desechos con las alternativas productivas empleadas para materiales orgánicos en el compostaje y la digestión anaeróbica, de ninguna manera se puede considerar que sea eco- lógicamente sostenible.<sup>28</sup>

Por último, es importante notar que existen tecnologías que convierten desechos en energía como una opción primaria o secundaria, que no se basan en la incineración de desechos y que sí juegan un papel importante en los resultados de la gestión de recursos sostenibles y la producción de energías renovables.

27 Smith, Brown, *et al.*, “Waste Management Options and Climate Change: Final report to the European Commission, DG Environment: Executive Summary,” julio de 2001.

28 Bell, L. y Bremmer, J., (2013) Burning Waste for Energy – It Doesn’t Stack Up. National Toxics Network Australia <http://www.ntn.org.au/wp/wp-content/uploads/2013/11/NTN-waste-to-energy-incineration-report-2013.1.pdf>



La tecnología más común se conoce como Digestión Anaeróbica (DA) la cual ‘fermenta’ la mezcla de materia orgánica, incluyendo desechos agrícolas, papel, drenaje, sobras de comida, etcétera, para producir gas metano en un sistema cerrado, para utilizar como combustible. Se atrapa el gas metano, el cual se puede utilizar como gas para cocinar, un gas combustible como fuente de energía para las turbinas al vapor o bien, convertido en líquido, como combustible para vehículos. La diferencia clave entre el desarrollo de ‘biogás’ procedente de la DA y el uso de la energía calórica de los incineradores es que los incineradores destruyen recursos (materia orgánica) para extraer el valor calórico a través de generar calor, emisiones tóxicas y crear cenizas tóxicas. El uso de la DA resulta en un gas de combustión relativamente limpio mientras que a la par *retiene el recurso* o la materia orgánica, la cual, posterior al procesamiento, se conoce como ‘digestato’. Este material se puede agregar a la composta o bien utilizar para acondicionar la tierra ya que le añade capacidad de retención de carbono y fertilidad a la tierra.

La tecnología para la destrucción de COP conocida como la reducción química en fase gaseosa es una segunda forma de energía que se puede generar a partir de desechos. También se puede utilizar la generación de metano a partir de una tecnología para la destrucción de COP basada en hidrógeno que genera energía sin emisiones atmosféricas tóxicas ni residuos sólidos. En los siguientes capítulos se describe esta tecnología de manera detallada.

### 2.3 INCINERADORES PARA RESIDUOS MÉDICOS

El principal propósito de los incineradores para residuos médicos es la desinfección de patógenos biológicos en los desechos médicos y clínicos por medio de la combustión de los desechos a temperaturas que varían entre 850°C y 1000°C. Este tipo de desechos incluyen ropa médica, vendajes, material de curación, bolsas de sangre y plásticos contaminados, incluyendo partes corporales, entre otros materiales. El alto contenido de PVC en los plásticos de los desechos médicos puede llevar a la formación elevada de COP clorados como los policlorodibenzodioxinas (PCDD) y policlorodibenzofuranos (PCDF), más comúnmente conocidos como dioxinas y furanos en las emisiones atmosféricas y los residuos sólidos (cenizas). Rara vez se diseñan incineradores para residuos médicos con la función de generar energía como subproducto.

### 2.4 INCINERADORES DE DESECHOS PELIGROSOS

Los incineradores de desechos peligrosos se utilizan para incinerar desechos peligrosos, tanto sólidos como líquidos, con la intención de des-

truirlos. Los tipos de desechos pueden ser diversos e incluyen desechos de hidrocarburos (aceites, solventes, alquitranes, subproductos de la refinación del petróleo), plaguicidas y herbicidas, desechos con metales pesados, desechos de COP, plásticos y desechos químicos, etcétera. Este tipo de incinerador opera a altas temperaturas de 1000°C a 1200°C y se requiere que tenga sistemas de control de proceso avanzado, que son muy caros y complejos, para procurar evitar las emisiones de COP y demás materiales tóxicos. Los incineradores de desechos peligrosos no se caracterizan por generar energía para consumo externo.

Este capítulo del informe discute algunos de los problemas clave relacionados con la sustentabilidad y la contaminación asociados más ampliamente con la incineración de desechos. Los impactos incluyen la destrucción de recursos valiosos, de emisiones atmosféricas de COP, metales pesados y otros compuestos tóxicos junto con la generación de millones de toneladas de ceniza tóxica; todas estas son razones clave para reemplazar la incineración por el uso generalizado de tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de desechos de COP.

El siguiente capítulo describe detalladamente las tecnologías establecidas y emergentes que se están utilizando específicamente para la destrucción de desechos de COP, los desechos peligrosos más tóxicos programados para su destrucción bajo el Convenio de Estocolmo.

# 3. LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA EXISTENCIAS DE COP Y SITIOS CONTAMINADOS

Generalmente se discuten las tecnologías alternativas a la combustión en términos de su capacidad para destruir existencias discretas de desechos de COP como aceites de PCB, plaguicidas y desechos industriales contaminados. Sin embargo, también se les puede adaptar, a través de una gama de técnicas, para permitir la remediación de sitios contaminados. En la sección que sigue, se destacan las tecnologías que se han desarrollado con el fin de permitir su aplicación para la remediación de sitios contaminados.

## 3.1 MOLIENDA DE BOLAS (DESTRUCCIÓN MECANO-QUÍMICA)

Tres compañías han desarrollado versiones piloto y comerciales de esta tecnología. Environmental Decontamination Limited<sup>29</sup> (EDL) es una compañía basada en Nueva Zelanda que opera en Asia y Europa que utiliza el proceso de destrucción mecano-química (MCD por sus siglas en inglés). Tribochem, de Alemania, maneja una tecnología similar basada en los mismos principios (Birke y Brodowski, 2002), denominada proceso de Deshalogenación por medio de Reacciones Mecano-Químicas (DMCR por sus siglas en inglés)<sup>30</sup>. Se ha utilizado 'Radical Planet Technology' de Japón (USEPA 2005, Shimme *et al.* 2008) para la destrucción de PCB comerciales. Actualmente, sólo EDL realiza actividades de remediación en sitios comerciales contaminados.

Los principios básicos de la molienda de bolas involucran la agitación de bolas de acero con una energía elevada dentro de un recipiente cerrado de acero lleno de medios contaminados como los desechos de COP o tierra contaminada con COP, a los cuales se les agrega un reactivo. Los puntos de colisión de las bolas entre sí y de las bolas con la superficie son las

<sup>29</sup> <https://edl-europe.com/technology/>

<sup>30</sup> <http://www.tribochem.de/>

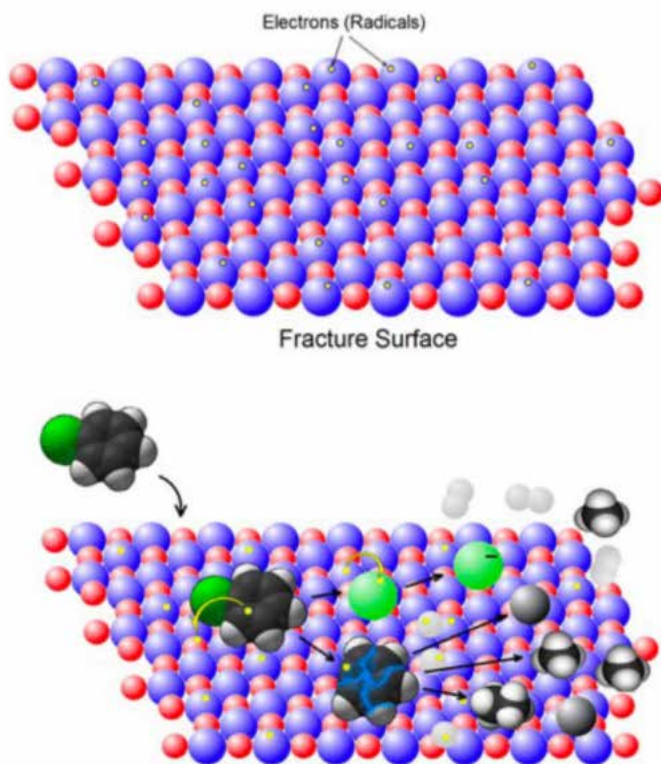
principales regiones de fractura y de inicio de reacciones químicas. Las reacciones inducidas en el punto de fractura, incluyen la formación de radicales y la transferencia de electrones que resultan en la destrucción de los enlaces químicos.

Según EDL:

*“La investigación actual indica que la destrucción mecano-química de los contaminantes orgánicos es compleja y cuenta con dos o más mecanismos de reacción paralela. Sin embargo, el camino dominante de la destrucción es la ionización que conduce a la completa deshalogenación y fragmentación de los COP. A través del procesamiento mecano-químico, se crean superficies fracturadas de matrices de tierras contaminadas que conducen a superficies altamente reactivas. Estos sitios reactivos pueden ionizar las moléculas contaminantes que caen sobre ellas, formando radicales contaminantes que se fragmentan en iones ‘hijos’ más pequeños y finalmente en especies neutras.”* Para lograr la plena mineralización de COP clorados o la deshalogenación de COP bromados y fluorados, es necesario refinar los parámetros como la duración y la frecuencia de la agitación y el tipo y concentración del reactivo. La molienda se realiza en una fase sólida, a temperaturas y presiones modestas sin el uso de solventes. Los co-reactivos pueden incluir óxidos y metales alcalino-térreos, cuarzo o bien una combinación de los mismos. Al final, el tratamiento arroja: carbono, dióxido de carbono, agua y haluros inorgánicos (Cagnetta *et al.*, 2016a). El costo operativo principal es el uso de energía por parte del sistema, ya que la planta no requiere de solventes peligrosos o de otros insumos químicos ni de cualquier otra forma de depuración de gases de combustión. Bajo condiciones normales de tratamiento de los desechos de COP, el proceso no genera COPNI, aunque se ha demostrado que cuando se le da tratamiento a los desechos de los COP y a las cenizas volantes secundarias del cobre, se reforman las dioxinas (Cagnetta *et al.* 2016b).

Los reactivos caen en cuatro categorías principales:

1. Agentes reductores, que son principalmente metales e hidruros metálicos de valencia cero
2. Bases de Lewis como los óxidos metales, sobre todo óxidos alcalinos y alcalinotérreos, como CaO
3. Especies neutras como el cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y la alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



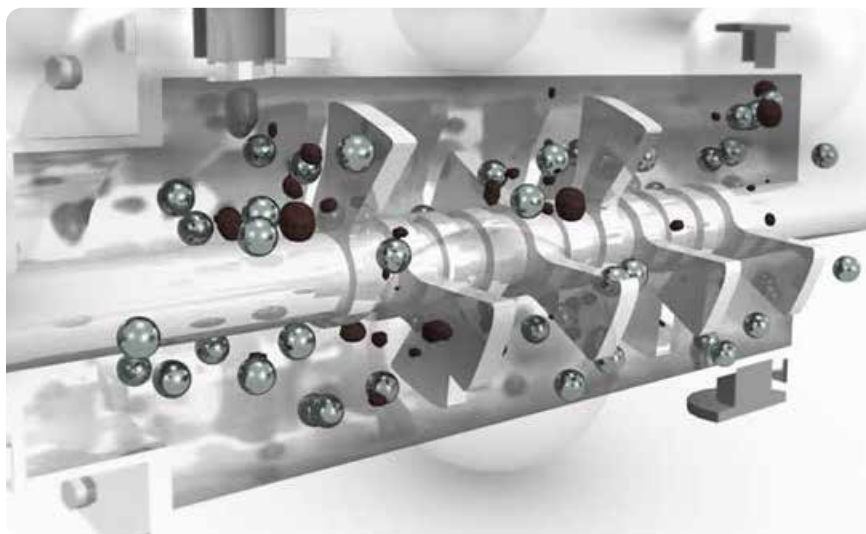
**Figura 2. Destrucción de enlaces químicos con impactos altos de la molienda de bolas.** Fuente: EDL Europe

4. Agentes oxidantes como dióxido de manganeso (Cagnetta *et al.* 2016b)

La ventaja de los sistemas de molienda de bolas que utilizan estos reactivos para la destrucción de COP es que, por lo general, no son peligrosos, son relativamente económicos y se encuentran ampliamente disponibles, lo cual hace que resulten atractivos para la remediación de sitios en países en desarrollo y economías en transición. Un atractivo adicional es la transportabilidad de las máquinas de molienda de bolas a pequeña escala, como los modelos de EDL que se pueden operar in-situ en los sitios contaminados y cuya capacidad se puede ir aumentando para incrementar las cantidades procesadas.



**Figura 3. Los molinos de bolas compactos y modulares de EDL son fácilmente transportables a existencias remotos.** Fuente: EDL Europe



**Figura 4. Visualización gráfica interna del molino de bolas de destrucción mecano-química de EDL con 'rotores' para aumentar la agitación.** Fuente: EDL Europe

**TABLA 3.** PROCESAMIENTO, TASAS DE ALIMENTACIÓN Y CONSUMO DE ENERGÍA DE TECNOLOGÍAS MECANO-QUÍMICAS.

Características esenciales de las tecnologías mecano-químicas existentes piloto/de escala completa.

Compañía	Tecnología	Tipo de dispositivo de molienda	Procesamiento	Alimentación máxima	Requisitos de energía
Environmental Decontamination Ltd., Nueva Zelanda <a href="http://www.edl-asia.com">www.edl-asia.com</a>	Destrucción mecano-química, MCD™	Molino de bolas con agitador	Continua	15 t/h	75 kWh/t
Radical Planet Research institute Co. Ltd., Japón <a href="http://www.radicalplanet.co.jp">www.radicalplanet.co.jp</a>	Tecnología de Radical Planet	Molino de bolas planetario	Por lote	200 kg	540 kW
Tribochem.de, Alemania <a href="http://www.tribochem.de">www.tribochem.de</a>	Deshalogenación a través de reacción mecanoquímica (DMCR)	Molino vibratorio	Por lote / Continua	1 t/h	160 kW*

\* Recuperado del sitio web de Siebtechnik GmbH: [www.siebtechnik-gmbh.de](http://www.siebtechnik-gmbh.de)

El pre-tratamiento de matrices contaminadas puede involucrar una pre-trituración a un nivel óptimo de insumos de 10mm, una reducción de la humedad a menos de 2% y la eliminación magnética de detritos de metal de sitios altamente perturbados.

El proceso de EDL se utilizó inicialmente en el año 2004, para la remediación de sitios contaminados a gran escala en Mapua, Nueva Zelanda en donde 8,650 m<sup>3</sup> de tierras fuertemente contaminadas con lindano, DDT, dieldrina y aldrina, permitiendo así que el sitio se pudiera utilizar para propósitos residenciales al caer dentro de los márgenes de los valores de las directrices de la regulación de la tierra. También se ha utilizado el proceso para el tratamiento de tierras contaminadas en Estados Unidos, Japón y los Países Bajos, para el tratamiento de sitios contaminados con dioxinas y PCB.

Desde 2012, la compañía ha estado involucrada en un proyecto para la remediación de un sitio en Bien Hoa, Vietnam. Durante la guerra de Vietnam, el sitio fue una base de la Fuerza Aérea de Estados Unidos en la cual se almacenaban grandes cantidades de defoliantes contaminados con dioxinas (Agente Naranja) que llevó en la contaminación de la tierra y los mantos freáticos. El tratamiento piloto, financiado por el PNUMA y



**Figura 5.** Molino de bolas de EDL tratando desechos de dioxinas de alta intensidad en Bien Hoa, Vietnam.

FMMA, resultó en el tratamiento exitoso de 150 toneladas de tierra con altas concentraciones de dioxinas.

**TABLA 4.** LA REDUCCIÓN DE LOS NIVELES DE COP EN TIERRAS CONTAMINADAS CON DIOXINAS EN BIEN HOA, VIETNAM A TRAVÉS DEL PROCESO DE DESTRUCCIÓN MECANO-QUÍMICA DE EDL.

Contaminante	Concentración no tratada (ng/kg TEQ)	Concentración tratada (ng/kg TEQ)	Porcentaje reducido
PCDD/F	28,500	338	98.80%
Dioxinas similares a los PCB	15.9	0.41	97.40%

Fuente: EDL Europa



Aunque los parámetros de optimización de la destrucción (el ajuste de las proporciones de los reactivos) sufrieron el impacto de los tiempos de respuesta del laboratorio, los ensayos piloto en el sitio llevaron a una reducción de los niveles de dioxina en la tierra de cerca de un 99%<sup>31</sup> Sin embargo, el ensayo de destrucción de dioxinas motivó el apoyo de los Asesores de las Naciones Unidas:

*“Para resumir, se considera que la tecnología de destrucción mecano-química de EDL reúne la capacidad técnica para aplicar remediaciones a la gran mayoría de las tierras contaminadas con PCDD/F que se puedan encontrar que cuenten incluso con un uso de suelo más restrictivo y como tales se les pueda considerar en cualquier oportunidad comercial que surja incluyendo los trabajos de remediación pendientes en Bien Hoa sin tener que proporcionar mayor demostración de este tipo; además, serían elegibles como sitios contaminados abordados a nivel global por el FMMA.”*

– FMMA/PNUMA, Evaluación Independiente de Tecnología (2015)

### 3.2 LA REDUCCIÓN QUÍMICA EN FASE GASEOSA (RQFG)

El proceso de RQFG<sup>32</sup> involucra la reducción termoquímica de compuestos orgánicos. Cuando alcanza temperaturas mayores de 850°C y a presiones bajas, el hidrógeno reacciona con los compuestos organoclorados, produciendo principalmente metano, hidrógeno, cloruro de hidrógeno (en caso de que los desechos estén clorados) y cantidades menores de hidrocarburos de bajo peso molecular (benceno y etileno). El ácido clorhídrico se neutraliza a través de agregar sosa cáustica durante el enfriamiento inicial de los gases de proceso o bien se le puede retirar como ácido para ser reutilizado posteriormente. Se puede descomponer la tecnología de RQFG en tres operaciones unitarias básicas: un sistema frontal (en donde se transforman los contaminantes en una forma adecuada para la destrucción en el reactor), un reactor (que a través de utilizar hidrógeno y vapor, reduce los contaminantes, que en esta etapa se encuentran en fase gaseosa) y un sistema de depuración y compresión de gases.

Para el DDT, HCB, PCB, PCDD y PCDF, se han reportado eficiencias de destrucción de un 99.9999 % (Kümmling *et al.* 2001; Kümmling *et al.* 2002; CMPS&F 1997; Rahuman *et al.* 2000). Se ha reportado una ED mayor a 99.999 % para PCB, 99.999 % para PCDD contenidos en aceites

31 EDL (2018) Technology Factsheet: Mechano-Chemical Destruction (MCDTM)

32 A este proceso también se le puede llamar hidrogenación (Comisión Europea, 2017).

**TABLA 5.** DESEMPEÑO DE LA REDUCCIÓN QUÍMICA EN FASE GASEOSA (RQFG) EN PLANTAS A GRAN ESCALA.

Sitio	Ubicación	Periodo	COP	Cantidad de tierra tratada	Escala	Eficiencia de des-trucción
Kwinana Commercial Operations	Australia	1995 to 2000	PCBs DDT	2,000 tonnes	Full	>99.9999%, >99.9999%
Kwinana Hex Waste Trials	Australia	April 1999	HCB	8 tonnes	Full	>99.9999%
General Motors of Canada Limited	Canada	1996 to 1997	PCB Dioxins	1,000 tonnes	Full	>99.9999%, >99.9995%

1 tonne = 1 tonelada métrica. Fuente: D. Hallett.

de desecho que contienen PCB (PNUMA, 2000), así como de más de 99.9999 % para HCB y clorobencenos (Kümmling *et al.*, 2002, Arnold, 2003).

La RQFG es una tecnología *ex situ* utilizada para el tratamiento de desechos de COP de alta resistencia y funciona en dos etapas. En una primera etapa, se calienta la tierra contaminada en un procesador de reducción térmica por lotes (PRTL) en ausencia de oxígeno, hasta llegar a temperaturas de alrededor de 600°C. A una temperatura elevada, los compuestos orgánicos se desorben de la matriz sólida y entran en la fase gaseosa. Antes de eliminar de manera adecuada la tierra tratada, ya sea en el sitio o fuera de él, se le permite enfriar. El procesador de reducción térmica por lotes también se puede utilizar para sólidos al granel diferentes que la tierra, incluyendo tambos, equipo eléctrico, desechos en tambos, estibas de madera, concreto, escombros y una miscelánea de sólidos. Esto permite la descontaminación integral de los sitios en los cuales puede que también se requiera descontaminar las estructuras sometidas a demolición, el equipo de procesamiento desmantelado y el equipo de protección personal.

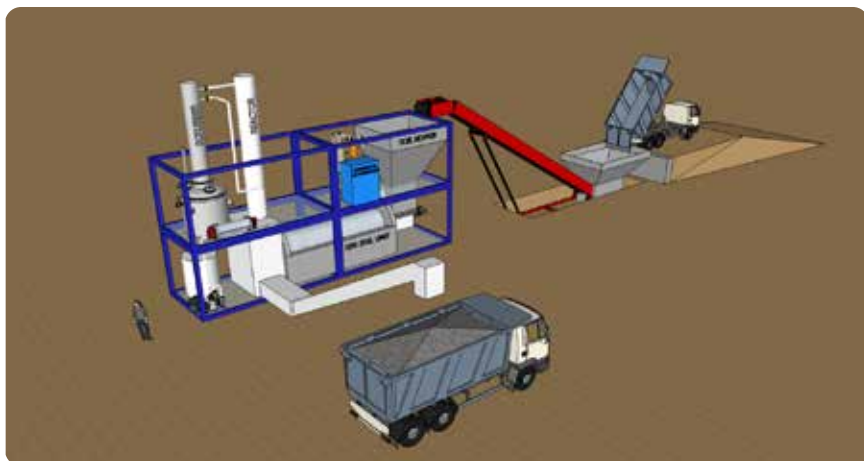
En una segunda etapa, los contaminantes desorbidos en su fase gaseosa pasan a un reactor de RQFG™™, en donde reaccionan con gas hidrógeno introducido a temperaturas que van de 850°C a 900°C. Esta reacción convierte a los contaminantes orgánicos principalmente en metano, agua e hidrógeno. Cuando hay presencia de contaminantes orgánicos clorados, también se pueden producir gases ácidos, como el cloruro de hidrógeno. Los gases producidos en la segunda etapa se depuran a través de torres de depuración cáusticas, para enfriar los gases, neutralizar los ácidos y eliminar partículas finas.

**TABLA 6.** PRUEBAS DE DESTRUCCIÓN SOBRE COMPUESTOS HALOGENADOS EN LA RQFG.

<b>Proyecto</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Eficiencia de destrucción y eliminación (%)</b>	<b>Criterios de los objetivos (%)</b>
EPA Estados Unidos - Bay City, Michigan (agua con aceite - 3 pruebas)	PCBs	99.9999	99.9999
EPA Estados Unidos - Bay City, Michigan (agua con aceite - 3 pruebas)	PCBs	99.9999	99.9999
General Motors of Canada Limited (Aceite con PCB - 3 pruebas)	PCBs	99.9999996	99.9999
	PCBs	99.9999985	
	PCBs	99.9999808	
Aceites con PCB (pruebas reglamentarias en Kwinana)	PCBs	99.999998	99.9999
DDT en tolueno (pruebas reglamentarias en Kwinana)	DDT	99.999984	99.9999
Aceites con PCB (pruebas reglamentarias japonesas)	PCBs	99.99998098	99.9999
	PCBs	99.99999977	99.9999
Ensayos de tratamiento de HCB (cristales de HCB - 3 pruebas)	HCB	99.999999	99.9999
	HCB	99.999999	99.9999
	HCB	99.9999	99.9999
Tratamiento de refrigerantes (CFC R-12 - 1 prueba)	Diclorodifluoro-metano	> 99.999	99.99

Fuente: D. Hallett

Los gases de escape que salen del depurador son ricos en metano y se les recolecta y almacena para su reutilización como combustible. Al metano también se le utiliza para generar hidrógeno en una reacción catalizada de alta temperatura. El agua utilizada por los depuradores recibe un tratamiento con filtros de carbón activado granulado antes de que se le descargue a través de los sistemas estándar de aguas de desecho (USEPA, 2010). Para asegurar la completa dechloración de los COP, se proporciona un espectrómetro de masas en línea que puede desviar todos los gases en la modalidad de recirculación. Posterior al paso de la depuración, la mezcla resultante de gases, rica en metano, propano e hidrógeno, se puede recircular por completo o en parte y se puede utilizar una fracción de los gases como combustible en la caldera del sistema (ONUUDI, 2007).



**Figura 6. La RQFG configurada para el tratamiento de tierras contaminadas.**

Fuente: D. Hallett



**Figura 7. Procesador por lotes de reducción térmica (TRBP) del sistema de la RQFG.** Fuente: D. Hallett

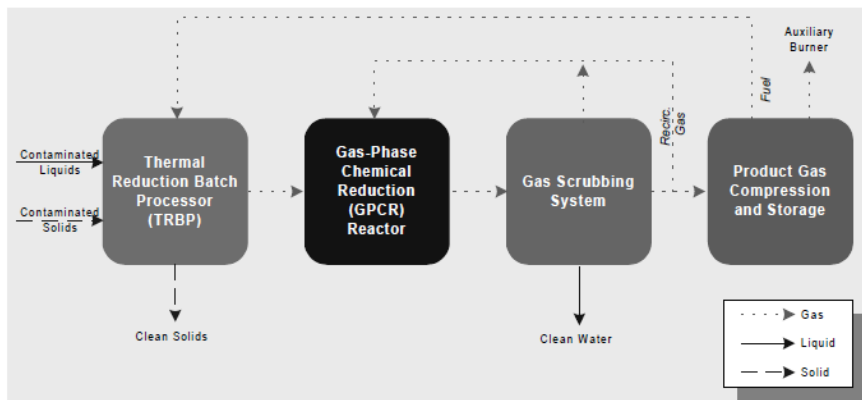
La RQFG ha funcionado a escala piloto y comercial en un rango de locaciones y le ha dado tratamiento a una amplia gama de desechos halogenados, incluyendo compuestos fluorados, a altas ED y EDE.



**Figura 8. La RQFG funcionando en un ciclo de 24 horas/7 días a la semana para el tratamiento de aceite con PCB de alta intensidad/desechos en Kwinana, Australia, 1999. Fuente: D. Hallett**

Mientras que el proceso de la RQFG utiliza hidrógeno bajo presión para descomponer los contaminantes orgánicos persistentes, también genera hidrógeno y metano como parte del proceso. Según la compañía Hallett Environmental and Technology Group Inc., comercializadora y diseñadora de tecnología, se diseñó la versión de tercera generación de la tecnología para exportar los excedentes de hidrógeno generados durante el proceso para que se les utilice como combustible<sup>33</sup>. También se puede generar metano para este propósito. Fue a fines de la década de los años noventa, que se utilizó la primera generación de esta tecnología en Kwinana, Australia, para la destrucción de alrededor de 2000 toneladas de desechos de PCB (IHPA, 2002). Actualmente se está desarrollando una planta piloto en Ontario, Canadá, utilizando la tecnología de la RQFG, para darle tratamiento a los residuos de trituradoras de automóviles contaminadas con BFR, plásticos impactados por COP y otros desechos. Esta versión de la tecnología se conoce como *Hydrogen Reduction* (reducción con hidrógeno) y está funcionando bajo una nueva patente. El costo de instalar una planta procesadora de residuos de trituradoras de automóviles (RTA) con una capacidad de 50 toneladas diarias, actualmente es del orden de unos 18 millones de dólares americanos, mientras que una unidad de destruc-

33 Comunicación personal con D. Hallett, septiembre de 2019.



**Figura 9. Esquema operativo de la RQFG.** Fuente: D. Hallett

ción de COP de plena escala comercial costaría aproximadamente 50 millones de dólares americanos.<sup>34</sup>

### 3.3 LA OXIDACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA (OASC) Y LA OXIDACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA PARA SU ESCALAMIENTO INDUSTRIAL (OASCI)

A lo largo de los últimos 30 años, un número de compañías han estado desarrollando sistemas de oxidación en agua tanto *supercrítica* como *subcrítica* y algunas de ellas cuentan con sustancial experiencia comercial en la destrucción de COP como el PCB. Las tecnologías comparten principios similares de destrucción de contaminantes orgánicos utilizando un agente oxidante como peróxido de hidrógeno, oxígeno o nitrito. El término *supercrítica* se refiere al estado del agua inmediatamente anterior a su fase de cambio de líquido a gas bajo una temperatura y presión determinadas (por ejemplo, 374°C y 218 atmósferas). El agua subcrítica se refiere al estado del agua inmediatamente por debajo de su nivel crítico (por ejemplo, 370°C y 262 atmósferas). En este estado, los materiales orgánicos se pueden oxidar y descomponer rápidamente. Para la destrucción de PCB, las condiciones típicas de reacción son temperaturas de entre 400 y 500°C, una presión de 25MPa, con un tiempo de reacción de 1 a 5 minutos.

Los sistemas supercríticos, en general, inyectan los desechos en una columna junto con el agua y el oxígeno; se mezclan, calientan y comprimen hasta que alcanzan el punto supercrítico. Se trata de un sistema total-

<sup>34</sup> Ibid.

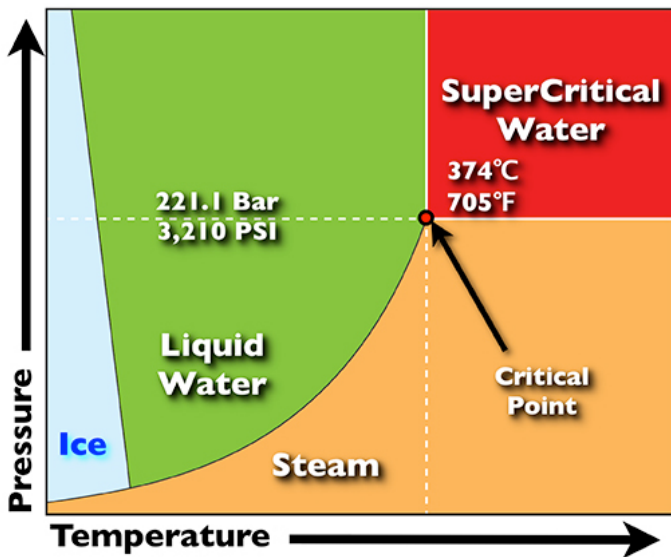


Figura 10. Parámetros para el agua supercrítica.

mente cerrado. En esta fase, las propiedades del agua cuentan con una elevada energía cinética molecular que es altamente reactiva y, combinada con oxígeno, puede oxidar y destruir los desechos orgánicos. La reacción produce nitrógeno, agua y dióxido de carbono. La destrucción de COP clorados resulta en una producción de niveles elevados de ácido clorhídrico. El ambiente altamente ácido que esto genera, requiere que el equipo estructural de los recipientes del proceso sean resistentes a la corrosión, como aleaciones de titanio en combinación con aditivos anticorrosivos como el carbonato de sodio.

El proceso no es adecuado para cuerpos sólidos, pero sí se le puede utilizar para dar tratamiento a desechos acuosos, aceites, soluciones, lodos y sólidos con un diámetro menor a 200  $\mu\text{m}$ . Se han realizado demostraciones del tratamiento de OACS para desechos sólidos una vez que se les tritura hasta conformar un lodo fino, utilizando materias primas que contengan hasta un 25 por ciento de sólidos en suspensión (USEPA 2010). Versiones anteriores de esta tecnología eran susceptibles a la corrosión y taponamientos de sal, pero esto se resolvió con el uso de materiales resistentes a la corrosión (ONUDI, 2007).

En el contexto de sitios contaminados con COP, la OASC generalmente se ha aplicado en una modalidad ex-situ en la cual se retiran los COP de las tierras contaminadas a través de la desorción o métodos similares, o

bien, en el caso de matrices de polvo de gran fuerza, se les tritura y reduce a un lodo, antes de que se les alimente al reactor.

A partir del año 2013, hubo 3 plantas plenamente operativas, 5 ya construidas y 9 planeadas para la construcción. Desde entonces, muchas de estas plantas se han vuelto operativas. La planta que lleva más tiempo de instalada, la opera la compañía Japan Environmental Safety Corporation (JESCO) en Japón y se utiliza para la destrucción de PCB, con una capacidad de 2000 kg de PCB diarios (Marrone *et al.*, 2013). Una planta en Japón que trata PCB de gran fuerza (100%), utilizando la oxidación de aguas subterráneas, tuvo emisiones al aire de PCDD/DF y dl-PCB de 0.00009 ng TEQ/m<sup>3</sup> y al agua de 0.0006–0.004 ng TEQ/L (Hosomi, 2006).

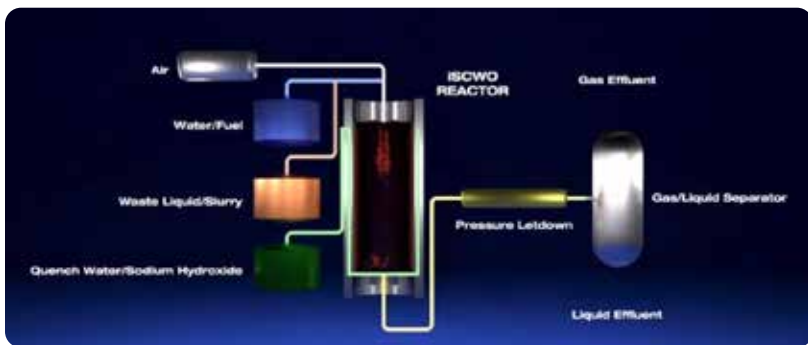
Aunque los costos pueden variar significativamente debido a la capacidad y el tipo de OASC que se desarrolle, un estudio realizado por Aki *et al.* (1998) halló que la destrucción de desechos peligrosos en la industria petroquímica se podría realizar a costos significativamente más bajos a través de implementar la OASC en vez de utilizar la incineración. Los costos de instalación son 15% menos elevados y los costos operativos de la OASC son sólo alrededor de un 10% de los costos de la incineración de líquidos peligrosos. Actualmente el ejército estadounidense utiliza la OASC ampliamente para la destrucción de desechos peligrosos y de armas químicas, incluyendo las unidades móviles basadas en barcos.

Marrone, al resumir una revisión integral del estado global de la OASC, señala que “*la comercialización de la tecnología de la OASC sigue siendo un área de gran interés y actividad*”. La principal ventaja de la OASC es que es baja en emisiones, de bajo costo, de alto ED y bajos recursos asociados (catalizadores) para su operación en áreas remotas. Diferentes investigadores (Goto, 2016, Liu *et al.*, 2016) y operadores industriales han realizado estudios sobre la OASC y los desechos plásticos.

General Atomics ha desarrollado modelos de procesamiento relativamente elevados diseñados para la destrucción tanto de desechos industriales peligrosos, en general, como de desechos no peligrosos. A esta tecnología se le refiere como Oxidación de Agua Supercrítica para su escalamiento industrial o OASCi. Actualmente, se está implementando un proyecto financiado por FMMA para el tratamiento de existencias de desechos de DDT en un sitio contaminado en Tayikistán y la República Kirguisa (GEF, 2017).

La OASCi de la compañía General Atomics funciona a través del siguiente proceso: se bombea aire en un recipiente de acero cerrado del reactivo y se le somete a una presión de 3200 psi, para posteriormente calentarlo a 650°C. Se le bombea agua y conforme va fluyendo el líquido hacia el





**Figura 11. Esquema de la OASCI.** Fuente: General Atomics

recipiente del reactivo, se activa la pre-ignición. Se calienta el agua y se le presuriza por encima del punto crítico, en términos termodinámicos de 650°C a 235 bar. Cuando se alcanza el punto crítico, se le agregan los desechos orgánicos mezclados con agua de enfriamiento (además de hidróxido de sodio, si se le requiere). Las condiciones supercríticas permiten que se mezclen en agua los materiales orgánicos, los reactivos y los productos de la oxidación, para su destrucción. Se procede a descargar el líquido restante a través de una reducción de la presión a condiciones atmosféricas.

Los productos de desecho líquidos y gaseosos procedentes del proceso consisten de dióxido de carbono, agua y, según los desechos de los que se trate, de sales y/o óxidos metálicos. Se ventila el vapor hacia la atmósfera. No se libera ninguna partícula o bien puede que se requiera de filtros de reducción de la contaminación. Se produce agua limpia que no requiere de ningún pre-tratamiento para descargarla al drenaje (el uso de las aguas residuales se ve limitado por el nivel elevado de salinidad y de óxidos metálicos).

### 3.4 LA DESCOMPOSICIÓN CATALIZADA POR BASE (DCB)

La DCB es una tecnología ex-situ que se ha utilizado para la destrucción de PCB y el tratamiento de tierras contaminadas con una alta concentración de PCB. Se desarrolló la DCB conjuntamente entre la Marina de Estados Unidos y la Autoridad de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés) para descontaminar líquidos, tierra, lodos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos clorados, sobre todo PCB, dioxinas y furanos. El proceso de la DCB fue aprobado por la Oficina de Sustancias Tóxicas de la EPA, bajo la ley de control de sustancias tóxicas TSCA10 para el tratamiento de PCB (ONUUDI, 2007). Posteriormente, se traspasó la patente de la tecnología a un grupo de desa-

rrolladores y actualmente tiene la patente la compañía BCD Group USA, que cuenta con permiso para operar en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, México, Japón, España y la República Checa.

Cuando existen mayores niveles de concentración de PBC en la tierra, puede que resulte necesario un pre-tratamiento como la desorción térmica indirecta para reducir los grandes volúmenes de material a volúmenes tratables. Se mezcla la tierra contaminada con algún álcali (como bicarbonato de sodio) y se les calienta a una temperatura entre 315°C y 500°C para permitir la evaporación de los compuestos halogenados. Se envían los contaminantes volatilizados a un condensador de doble etapa. Posteriormente, se somete al concentrado resultante a un proceso de DCB. El proceso de DCB consiste en mezclar el concentrado de desechos de COP en el recipiente del reactor con una mezcla de reactivos conformado por aceite donador de hidrógeno, hidróxido de metal alcalino y un catalizador patentado. Después de calentar la mezcla a 326°C, por espacio de entre 3 y 6 horas, se crea hidrógeno atómico altamente reactivo y bajo condiciones exotérmicas el hidrógeno se divide del aceite donante e hidrogena el cloro enlazado de los COP (suponiendo que se trata de COP clorados). En combinación con un reactivo patentado, la reacción resulta en vapor de agua y cloruro de sodio. Posterior a la evaluación de la reacción, se separan el aceite y el lodo del reactor, pudiéndose reciclar el aceite en el siguiente lote del proceso. Se pueden neutralizar los lodos para enviarlos a un relleno sanitario o bien utilizarlos para el tratamiento de desechos y aguas ácidas (ONUUDI, 2007).

Se han construido plantas de DCB modulares, transportables y fijas. La capacidad de procesamiento para la etapa de la desorción difiere según la aplicación que se realice y varía entre 100 kg/hr y 20 tons/hr (STAP GEF, 2004). El contenido de sólidos en el reactor de desechos limita a los reactores de DCB y, por lo general, le da tratamiento a entre 1 y 3 toneladas por lote y a entre 2 y 4 lotes diarios. Se ha demostrado que el DDT, PCB, PCP, HCB, HCH, y las dioxinas (PCDD/F) tienen altas eficiencias de destrucción (entre 4 y 6 nueves o 99.9999%). Tal como sucede con la mayoría de los reactores por lote y de las unidades de desorción indirecta, las emisiones son muy bajas. La masa total de los gases de combustión emitidos es por órdenes de magnitud más pequeño que los incineradores o que las unidades de desorción similares de calefacción directa (STAP GEF, 2004).

Se midieron los niveles de PCDD/PCDF en las emisiones atmosféricas para una DBC dentro de un rango entre 0.013 y 0.031 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>; y para los PCB, entre 0.005 y 0.0014 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>. En una de las plantas, las cantidades residuales de PCDD/PCDF en la descarga de aceite, fueron de menos de 0.016 ng TEQ/g (Holoubek 2006)

Se ha demostrado que esta tecnología puede tratar tanto COP de gran fuerza como procesar grandes cantidades de tierras contaminadas, incluyendo tierras fuertemente contaminadas impactados por dioxinas en la fábrica química de Spolana, en la República Checa (Grupo de Expertos del PNUMA sobre las MTD y las MPA, 2006). Los costos relativamente bajos de los aditivos (el hidróxido de sodio es el costo más elevado de todos los insumos) permiten que sea una tecnología adecuada para su aplicación en la mayoría de los países en desarrollo. Antes de la desorción térmica de los COP presentes en medios contaminados, puede que se requieran otros pasos previos al tratamiento, como la reducción de niveles de humedad y ajustes al pH, la trituración de escombros y materiales de la tierra de gran tamaño a diámetros menores. Antes del tratamiento, se deberán secar los lodos húmedos y se deberán retirar los solventes volátiles de los medios contaminados a través de la destilación (como, por ejemplo, los plaguicidas con portadores de solventes) (CMPS&F – Environment Australia, 1997).

### 3.5 LA HIDROGENACIÓN CATALÍTICA (HC)

Los vendedores de tecnología en Australia, Estados Unidos y Japón han estado utilizando la hidrogenación catalítica casi exclusivamente para el tratamiento y destrucción de los PCB, aunque se puede utilizar esta tecnología para el tratamiento de otros COP clorados.

El sistema Hydrodec, que utiliza la hidrogenación catalítica, es una tecnología desarrollada por la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/CSIRO) en Australia para la rehabilitación del aceite de transformador y simultáneamente para la destrucción de PCB. A este sistema originalmente se le conocía como hidrogenación catalítica. La compañía “Hydrodec” se estableció en 2004 e inició sus operaciones en Australia. La planta australiana actualmente procesa 6.5 millones de litros de aceites anualmente y la planta en Estados Unidos, 45 millones de litros anuales. En Japón, un proceso similar puede tratar 2 toneladas diarias de PCB puro con una ED de 99.9996-99.9999% (Vijgen, 2008).

Según los desarrolladores de tecnología en Australia (Duffy y Fookes, 1997), el proceso de Hydrodec se basa en la hidrogenación moderada de aceites residuales en un reactor catalítico de lecho empacado (un catalizador de gas hidrógeno y paladio sobre carbono (Pd/C) dispersado en aceite de parafina), operando a temperaturas y presiones moderadas. Bajo condiciones de proceso, el hidrógeno reacciona con heteroátomos en el aceite mismo y también con cualquiera de los organoclorados presentes. Los catalizadores de metales nobles son efectivos, aunque se sabe que se



**Figura 12. Planta Hydrodec en Canton, Ohio, Estados Unidos.**

envenenan con facilidad con contaminantes como el azufre contenido en el aceite. Los desarrolladores de Hydrodec superaron este problema a través de utilizar aditivos patentados que eliminan el cloruro de hidrógeno y aseguran que el ácido clorhídrico producido no llegue a degradar el catalizador y reduce la reacción de craqueo de los hidrocarburos en la superficie del catalizador. Después de un programa de optimización del catalizador y del proceso, resultó posible mantener la estructura hidrocarbonada del aceite de transformador esencialmente sin cambios y, a la vez, lograr una destrucción de PCB mejor que 99.999% (Duffy y Fookes, 1997).

**TABLA 7.** LA EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN Y EL PROCESO DE HC.

<b>Compuesto</b>	<b>Concentración de alimentación (mg/kg)</b>	<b>Concentración de productos (mg/kg)</b>	<b>Eficiencia de destrucción (%)</b>
PCB	40000	< 0.027	> 99.99993
DDT	40000	< 0.004	> 99.99999
PCP	30000	< 0.003	> 99.99999
HCB	1340	< 0.005	> 99.9996
1,2,3,4-TCDD	46	< 0.000004	> 99.99999

Mientras que la aplicación comercial del proceso consiste en la destrucción de PCB y el rejuvenecimiento del aceite de transformador libre de PCB, se han realizado experimentos en un rango de COP (ver Tabla 7) con elevados resultados de la ED y se le considera aplicable a la mayoría de los COP en forma líquida. En el contexto de sitios contaminados, se necesitarían eliminar los COP de las matrices contaminadas a través de un pre-tratamiento antes de la deshalogenación en la unidad de HC.

Japón también ha estado operando plantas de hidrogenación catalítica desde inicios de la primera década del siglo XXI. En una planta japonesa con una capacidad de dos toneladas diarias operada por JECISO (Osaka) y desarrollada por Kanden Engineering, se midieron niveles muy bajos de PCDD/F y dl-PCB de alrededor de 0.00001-0.0001 ng TEQ/g en bifenilos posterior a la reacción por destilación, además de niveles muy bajos de PCDD/F y dl-PCB en emisiones atmosféricas en el orden de 0.0001 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (Hosomi 2006).

### 3.6 LA DECLORACIÓN CATALÍTICA UTILIZANDO CATALIZADORES DE COBRE (DCC)

La DCC es un proceso basado en la dehalogenación selectiva como su principal operación, mientras que suprime las reacciones de acoplamiento. El proceso utiliza una reacción a través de un intermedio de aril cobre que promueve la transferencia de electrones. La DCC opera a 250-300oC con un tiempo de reacción de 3 a 6 horas en una atmósfera deficiente de oxígeno y una concentración de cobre en relación a los desechos de aproximadamente 0.1 wt.% (Vijgen, 2014). Para el tratamiento de desechos contaminados con DDT, HCB, PeCB, PCDD/PCDF, PCB y PCP (Ocelka, 2017), se ha reportado una eficiencia de destrucción de 99.999966 por ciento.

La DCC ha demostrado la capacidad para tratar diferentes tipos de desechos incluyendo tierras contaminadas y materiales de construcción, cenizas volantes, además de desechos líquidos y sólidos que contengan COP y arenas de filtración (Ocelka, 2010). Para las arenas y tierras contaminadas con COP, puede resultar útil utilizar un proceso de pre-tratamiento como la desorción térmica para la concentración de desechos de COP, con el fin de reducir el volumen en el reactor. Este proceso puede gestionar desechos concentrados de COP y se ha comprobado que destruye la mayoría de los compuestos aromáticos clorados y/o cíclicos (Vijgen, 2014).

Un depurador húmedo logra capturar el HCl que se libera como parte de la hidrodechloración de compuestos organoclorados. Un filtro de carbón captura las posibles aguas residuales semi-volátiles provenientes de la reacción, las cuales se reciclan para regresarlas al reactor de DCC; se capturan los COP residuales de los depuradores húmedos a través de arcillas organofílicas o una columna de carbón, dándose una mayor destrucción de la fase sólida en el reactor de DCC (Vijgen, 2014).

En una operación comercial en Jaworzno, Polonia se ha utilizado tecnología de DCC y también se ha aplicado en parte para la descontaminación de las tierras contaminadas con COP de plaguicidas en Klatovy, República Checa (Ocelka 2011; Ocelka 2017)

### 3.7 LA REDUCCIÓN CON METALES ALCALINOS (REDUCCIÓN CON SODIO)

La reducción con metales alcalinos involucra el tratamiento de desechos en donde el metal alcalino disperso reacciona con los átomos de cloro contenidos en los compuestos clorados de los desechos halogenados para producir sales y desechos no halogenados. Típicamente, el proceso opera a presión atmosférica y a temperaturas entre 60°C y 180°C (Ariizumi, Otsuka *et al.*, 1997). El tratamiento se puede efectuar ya sea in situ (como en el caso de los transformadores contaminados con PCB) o bien ex situ en un recipiente de reacción. Existen diferentes variaciones de este proceso (Piersol, 1989). Aunque se ha utilizado potasio y aleaciones de potasio, el sodio metálico es el agente reductor que se utiliza más comúnmente. El proceso debe evitar la formación de un polímero (que ocurre en una o dos de las tecnologías identificadas) o bien debe tomar en cuenta la formación de este sólido e introducir una fase de separación para producir aceite puro reutilizable.

En el contexto de los sitios contaminados, se puede utilizar esta tecnología para el tratamiento de existencias de transformadores eléctricos que contengan aceites de PCB y además para el tratamiento directo de los PCB, una vez extraídos de las matrices sólidas en una fase de pre-tratamiento.



**Figura 13. Destrucción de PCB in-situ utilizando SR en Francia.**

Se podría realizar el tratamiento de condensadores y transformadores completos a través de una reducción de su volumen por medio de desguazarlos. El pre-tratamiento deberá incluir la deshidratación a través de la separación por fases, la evaporación, o bien otro método para evitar reacciones explosivas con el sodio metálico. El equipo se deberá lavar con solventes orgánicos. De manera similar, los COP sólidos o en estado adsorbido necesitarían disolverse a la concentración requerida o bien extraerse de las matrices (Piersol, 1989; UNEP, 2004). El proceso está disponible en configuraciones transportables y fijas (UNEP, 2000). Las instalaciones móviles tienen la capacidad de tratar 15,000 litros diarios de aceite de PCB para transformadores (UNEP, 2000).

Se han reportado valores de eficiencia de destrucción (ED) mayores a 99.999% y valores de eficiencia de destrucción y eliminación (EDE) de 99.9999% para el clordano, el HCH, y los PCB (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2004). Tanto en la Unión Europea, como en Australia, Canadá, Japón, Sudáfrica y Estados Unidos se ha demostrado que el proceso de reducción con sodio cumple con los criterios regulatorios de esos países para el tratamiento de aceites para transformadores con PCB, es decir, menor a 2mg/kg en desechos sólidos y líquidos (PNUMA, 2004).

En Japón, se encuentran la mayor concentración de instalaciones para la reducción con metales alcalinos. Las plantas que operaban en 2006, estaban tratando aceites contaminados con bifenilos policlorados (PCB).





**Figura 14. Desechos de una unidad SR.**

Un número de plantas estaban tratando PCB con concentraciones dentro de un rango de 100 partes por millón, mientras que otras estaban utilizando concentraciones de hasta un 10 por ciento. En todas las plantas, se trataban los gases de escape con carbono activado (UNEP – EG BAT/BEP, 2006).

Japón cuenta con considerable experiencia en técnicas para la reducción con álcalis para la destrucción de COP y ha registrado elevados niveles de destrucción. En una planta, (de reducción álcali de Toyota/JESCO) las emisiones de PCDD/DF y dl-PCB a la atmósfera y el agua que se midieron resultaron bajas una vez que se habían destruido los PCB. Se alcanzaron niveles de  $<0.002$  ng TEQ/Nm<sup>3</sup> en los gases de escape y de 0.00005–0.0001 ng TEQ/L en los desechos de agua. El material sólido residual del proceso se encontró en un rango de 1.7–54 ng/g para los PCB y de 0.0018 ng TEQ/g para las PCDD/los DF y los dl-PCB (Hosomi 2006).



### 3.8 LA TECNOLOGÍA DE ELECTRONES SOLVATADOS (TES)

La Tecnología de Electrones Solvatados (TES) es una tecnología alternativa a la combustión ex-situ utilizada en el tratamiento de tierras contaminadas y reduce los PCB a sales metálicas y moléculas que se han deshalogenado.

En general, se forman los electrones solvatados cuando se disuelven ciertos metales alcalino-térreos (como sodio, calcio, litio y potasio) en amoníaco y forman iones metálicos y electrones libres. Estos electrones libres producen un fuerte agente reductor que elimina halógenos (primordialmente cloro) de las moléculas orgánicas y reduce otros contaminantes. Los sub-productos provenientes del tratamiento de desechos contaminados con PCB, incluyendo hidrocarburos de petróleo, cloruro de sodio y amida de sodio (Tauw, 2020).

Se puede utilizar el proceso de la TES para el tratamiento de tierras contaminadas, aceites usados, lodos y plaguicidas (Vijgen, 2003).

En el caso de tierras contaminadas, una vez examinadas, se deshidrata la tierra contaminada con PCB, se le coloca en un recipiente de tratamiento sellado y se mezcla con amoníaco hasta que quede como lodo acuoso. El lodo acuoso se mezcla con calcio o sodio hasta que concluya la reacción. Se transfiere la mezcla a un recipiente para separar el amoníaco de la tierra y retirar el amoníaco líquido. Se sigue mezclando para eliminar el amoníaco restante como vapor. Se puede recolectar el líquido y el vapor de amoníaco en un recipiente separador de amoníaco/agua, se retira el agua y se recicla el amoníaco, colocándolo en un taque de almacenamiento para su uso posterior (Tauw, 2020).

Se ha utilizado el proceso de los electrones solvatados para destruir COP y demás contaminantes en la tierra, incluyendo PCB, PAH, solventes clorados, dioxinas, furanos, plaguicidas, hexaclorobenceno, BTX, volátiles y semi-volátiles (Vijgen, 2003).

Desde fines de la década de los noventa, se ha estado utilizando la TES para el tratamiento de las tierras contaminadas con PCB, dioxinas y otros COP con resultados que indican niveles elevados de destrucción de los compuestos blanco.

**Figura 15. Tratamiento de aceites de desecho contaminado con dioxinas utilizando TES™.**

Contaminante	Pre-tratamiento (ppt)	Pos-tratamiento (ppt)
Dioxinas	418500	2.3
Furanos	14120	1.3

Fuente: Vijgen 2003. McCormick and Baxter site, Stockton, CA

**Figura 16. Destrucción de PCB en aceites con TES™.**

Material	Pre-tratamiento (ppm)	Pos-tratamiento (ppm)
Aceite de motor usado	23339	< 1.0
Aceite de transformador	509000	20*
Aceite mineral	5000	< 0.5
Hexano	100000	0.5

\* Se requiere sodio adicional para una mejor reducción

Fuente: Vijgen (2003)

El proceso de la TES es una tecnología móvil que se puede instalar en sitios contaminados para el tratamiento de desechos de COP. Conlleva problemas de salud y seguridad ya que las sustancias químicas utilizadas en el proceso pueden ser peligrosas y el proceso de electrones solvatados es exotérmico en presencia de agua. Por esta razón, se deben pre-secar los materiales antes de someterlos al tratamiento. Como se nota en la Figura 16, agregar una cantidad insuficiente de reactivos puede llevar únicamente a una descomposición parcial de los contaminantes blanco.

### 3.9 LA OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA

Según la ONUDI, las tecnologías de oxidación electroquímica pueden abarcar un rango de técnicas incluyendo: tecnologías de oxidación no térmica (sin oxígeno) y tecnologías de oxidación con oxígeno en la fase densa (sin llama). Estos procesos incluyen procesos de oxidación electroquímica mediada (OEM) y oxidación con oxígeno en agua o en fundidos (ONUDI, 2007).

ONUDI (2007) describe el principio de los procesos de la OEM como sigue:

*Se lleva a un mediador electroquímico a su mayor estado de oxidación a través de una reacción electroquímica, y posteriormente*

*se le pone en contacto con un compuesto orgánico para que se oxide; el mediador, ya en un estado de oxidación más bajo, se regresa a la celda electroquímica. Los iones de cerio, formados como resultado de la disolución del cerio metálico en un ácido fuerte, mantienen una forma estable de  $Ce^{3+}$ . Cuando se oxidan y pasan a  $Ce^{4+}$ , el cerio adquiere un color ámbar profundo y se convierte en un oxidante muy fuerte.  $Ce^{4+}$  pasa a reaccionar vigorosamente con cualquier tipo de sustancia orgánica a la cual oxida, convirtiéndola en  $CO_2$  y agua, quedando reducida a  $Ce^{3+}$ . Después de que el cerio se reduce a  $Ce^{3+}$  a través de tomar un electrón de un compuesto orgánico, el cerio llega a la celda electroquímica y se reoxida, convirtiéndose en  $Ce^{4+}$ , el cual se vuelve a introducir en la reacción con un compuesto orgánico, con lo cual se cierra el ciclo. Este ciclo únicamente parece ser catalítico, ya que participa el cerio y no se consume en la reacción, siendo recuperado cada vez para una nueva transformación. Sin embargo, este proceso no se debe confundir con una verdadera catálisis, ya que la recuperación del mediador se da de manera artificial y por separado.*

Aunque durante el tratamiento de desechos de COP, los diferentes procesos de oxidación electroquímica tienen tanto ventajas como desventajas, cuando se dirigen a flujos adecuados de desechos, pueden ser muy efectivos. Una de las aplicaciones más recientes de esta tecnología se desarrolló para destruir compuestos extremadamente desafiantes como: los COP de las PFAS, los PFOS y los PFOA. Más adelante, se describe la tecnología De-Fluoro desarrollada por AECOM, junto con procesos más tempranos de oxidación electroquímica.

Entre las principales ventajas de los procesos de oxidación electroquímica, se encuentran su potencial para generar un nivel bajo de dioxinas, el hecho de que es un diseño compacto, modular y transportable, con condiciones operativas moderadas y la capacidad de tratar una amplia variedad de desechos, incluyendo desechos radioactivos, farmacéuticos y biotecnológicos. Sus desventajas son los altos niveles de uso de energía y el hecho de que es inadecuado para los COP de gran fuerza, que son poco solubles.

### **3.9.1 CerOx**

CerOx es una variación de la tecnología de la Oxidación Electroquímica Mediada (OEM). Se basa en la oxidación de compuestos orgánicos a través del uso de iones de cerio<sup>4+</sup>, que se define como catalizador o mediador.

CerOx es una tecnología de destrucción no térmica diseñada para destruir los desechos de materiales orgánicos peligrosos en estado líquido. Se trata de un proceso de fase acuosa accionado electroquímicamente que oxida



**Figura 17. El sistema CerOX Corp de la Universidad de Nevada.** Fuente: CerOX Corporation

desechos orgánicos bajo condiciones cercanas a la presión atmosférica y la temperatura ambiente en un sistema de tanque contenido. Se puede implementar desde la escala de un tanque relativamente pequeño hasta la de una planta completa (Varela *et al.* 2001). CerOx utiliza cerio en su estado

de mayor valencia (IV) para oxidar compuestos orgánicos. Los productos resultantes son dióxido de carbono, agua y gases ácidos inorgánicos (USEPA 2010).

Una celda electroquímica produce cerio (IV) con base en cerio (III). El proceso debe utilizar un flujo de desechos líquidos y tierras o sedimentos que se deben mezclar con agua para producir un lodo para el tratamiento. Una vez que se hayan mezclado los desechos en el recipiente con cerio (IV) y se les haya mezclado con sonicación, se trasladan los materiales a un reactor. La reacción en la fase líquida a 90-95°C destruye los compuestos orgánicos en los desechos. Durante el proceso, cerio (IV) se reduce a cerio (III) y se le recircula para regresar reciclado a la celda electroquímica (EPA-Estados Unidos, 2010). Posteriormente, se reactivan los gases generados durante esta primera fase, incluyendo el CO<sub>2</sub>, el gas de cloro y los COV en una cámara de fase gaseosa con cerio (IV) para destruir los COV. Un depurador final elimina los gases ácidos antes de ventilarlos en la atmósfera.

El proceso ha sido utilizado en la Universidad de Nevada, Reno para el tratamiento de plaguicidas con COP. Los ensayos realizados por la corporación CerOx antes de su instalación en la universidad logró una eficiencia de destrucción de 99.995% al estar tratando clordano de gran fuerza. Las pruebas de tratamiento hecha a los PCB y a las dioxinas, se disolvieron en alcohol isopropílico. La concentración de insumos de dioxinas fue de 5 ppb. Los resultados de tres pruebas de aguas residuales de salida, mostraron dos casos no detectados (el límite de detección, LOD, fue de 0.397 ppt) y un nivel de 0.432 ppt (USEPA, 2010). Se redujo una muestra de PCB en alcohol isopropílico a una concentración de insumos de 2 ppm a un nivel de salida<sup>35</sup> por debajo de un límite de detección, LOD, de 0.4 ppb.

### **3.9.2 DE-FLUORO (AECOM)**

DE-FLUORO de AECOM es la tecnología de oxidación electroquímica desarrollada más recientemente para el tratamiento de los desechos de COP. Se desarrolló esta versión de la oxidación electroquímica de manera específica para destruir los compuestos de las PFAS, específicamente las sustancias 'reguladas' del ácido perfluorooctanoico (PFOA) y el ácido perfluorooctanesulfónico (PFOS) en agua. Tanto los PFOS como los PFOA tienden a ocurrir juntos en sistemas de aguas subterráneas contaminadas como resultado de su uso tradicional en espumas acuosas contra incendios (AFFF) durante un incendio y más frecuentemente a través de su uso en la capacitación en extinción de incendios en aeropuertos, bases militares,

---

35 CerOx™ Corporation. 2005. Process Technology Overview

instalaciones de la industria del petróleo y el gas, y servicios de emergencia.

Actualmente, la contaminación de mantos freáticos con sustancias per- and polifluoroalquiladas (PFAS) es un problema central de contaminación en muchos países. En Estados Unidos, a nivel nacional, se han identificado alrededor de 700 sitios contaminados con PFAS, los cuales contaminan el agua potable proveniente de los mantos freáticos de hasta 110 millones de personas (EWG, 2018). Los efectos sobre la salud causados por la exposición a PFAS incluye:

- un aumento en la probabilidad de tener una enfermedad de la tiroides
- una caída en la respuesta inmunológica
- un aumento en los niveles de colesterol
- un aumento en la probabilidad de tener cáncer, sobre todo del riñón y los testículos<sup>36</sup>
- efectos sobre el desarrollo y la inmunotoxicidad (Lee *et al.*, 2017; Nordén, Berger y Engwall, 2016)

Se estableció el Panel Científico C8 para investigar los probables vínculos entre la contaminación con PFAS del agua potable en el Valle Mid-Ohio y la aparición de enfermedades entre los habitantes locales. Se concluyó que los impactos en la salud incluyen diagnósticos de niveles elevados de colesterol, colitis ulcerosa, enfermedades de la tiroides, cáncer de testículo, cáncer de riñón e hipertensión inducida por el embarazo.<sup>37</sup>

El increíblemente fuerte enlace carbono-flúor es el enlace covalente polar entre el carbono y el flúor que es la base de todos los compuestos organofluorados, incluyendo los compuestos de las PFAS. La fuerza de este enlace hace que las PFAS sean muy difíciles de destruir y ha llevado a muchos problemas cuando se busca remediar los mantos freáticos contaminados con PFAS. Aunque existen más de 4,000 compuestos organofluorados (Sunderland *et al.*, 2019) dentro de la categoría de las PFAS, hasta la fecha únicamente se han evaluado el PFOA y el PFOS como COP.

Una de las pocas técnicas que pueden romper exitosamente el enlace carbono-flúor, es la oxidación electroquímica. Existen estudios que demuestran que puede mineralizar el PFOA y el PFOS por completo a una mayor velocidad y con un consumo de energía relativamente bajo, a temperatura ambiente y a la presión atmosférica. Los estudios muestran que

36 PFAS Exposure and Your Health, 4/2019, [https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/2019-4-23\\_PFAS\\_Exposure\\_and\\_Your\\_Health\\_-\\_APPROVED\\_WEB\\_653460\\_7.pdf](https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/2019-4-23_PFAS_Exposure_and_Your_Health_-_APPROVED_WEB_653460_7.pdf)

37 <http://www.c8sciencepanel.org/index.html>



**Figura 18. 704 sitios militares estadounidenses con liberaciones de PFAS confirmadas y sospechosas.** Fuente: EWG 2018

este enlace puede mineralizar la composición de una mezcla de PFAS y otros co-contaminantes bajo condiciones in situ (Gómez-Ruiz *et al.*, 2017; Trautmann, Schell, Schmidt, Mangold y Tiehm, 2015; Zhuo *et al.*, 2012)

La tecnología de DE-FLUORO es una tecnología de oxidación electroquímica que se ha optimizado para la destrucción (mineralización) del PFOA y el PFOS. El equipo que desarrolló esta tecnología en AECOM ha realizado un rango de ensayos utilizando diferentes materiales para electrodos y la optimización de las variables de proceso para alcanzar eficiencias de destrucción significativas en los compuestos concentrados de las PFAS.

El proceso de DE-FLUORO varía con respecto a otras tecnologías mediadas de oxidación electroquímica ya que utiliza electrodos de la fase de *Magnéli*  $Ti_4O_7$ . El subóxido de titanio de la fase de Magnéli es un material innovador para electrodos de cerámica que ha demostrado el potencial que tiene para la degradación de un rango de contaminantes<sup>38</sup> (Liang *et al.* 2018). Sin embargo, las limitaciones de este óxido de titanio para el

<sup>38</sup> Liang S, Pierce D, Lin H, Chiang D, Huang Q. Electrochemical oxidation of PFOA and PFOS in concentrated waste streams. *Remediation*. 2018;28:127-134. <https://doi.org/10.1002/rem.21554>

tratamiento de grandes volúmenes con concentraciones bajas que fluyen desde la transferencia de masa significa que es más adecuado para medios contaminados con altas concentraciones y volúmenes bajos.

El uso de resinas de intercambio iónico (IXR) y de carbono activado granulado (GAC) para adsorber y concentrar PFAS procedentes de altos volúmenes de aguas subterráneas contaminadas, resulta en volúmenes significativos de materiales ‘usados’ que han adsorbido la cantidad máxima de contaminantes de las PFAS antes de perder su eficiencia o de empezar a liberar contaminantes debido a una insuficiencia de la superficie adsorbente restante. Se pueden regenerar los adsorbentes GAC y IXR después de la eliminación de PFAS altamente concentradas. Mientras que se pueden regenerar las IXR en sitio utilizando una mezcla que contiene metanol y una solución de NaCl, el GAC se debe regenerar fuera del sitio bajo condiciones diferentes.

Cuando las IXR se someten a un proceso de regeneración, a los residuos líquidos restantes se les refiere como ‘residuos de destilación’, siendo una mezcla de una alta concentración de PFAS, sales y contenidos orgánicos residuales (Liang *et al.* 2018).

La oxidación electroquímica de DE-FLUORO logró destruir de manera efectiva las PFAS ‘reguladas’ (el PFOA y el PFOS) en los residuos de destilación producto de la filtración de las IXR y en un rango de aguas residuales contaminadas.

En algunos casos, el tratamiento de residuos de alta resistencia (utilizando el concentrado 3M AFFF) resultó en una menor destrucción masiva, pero esto se debió en gran medida al tiempo limitado de la reacción permitido por los ensayos y AECOM indica que una mayor permanencia en el proceso hubiera resultado en una destrucción de un 100% (AECOM 2019).



**TABLA 8.** REDUCCIÓN MASIVA DE PFAS A TRAVÉS DEL PROCESO DE DE-FLUORO.

<b>Descripción de muestras (Sector clientelar)</b>	<b>Concentración inicial total de PFAS (µg/L)</b>	<b>% Reducción masiva (total de PFAS) a través de DE-FLUORO™</b>	<b>Concentración inicial 'regulada' de PFAS (µg/L)</b>	<b>% Reducción masiva (de PFAS reguladas) DE-FLUORO™</b>
Zona de origen de aguas subterráneas (gobierno de Nueva Zelanda)	27	84%	13	98%
Aguas residuales industriales (productores químicos)	354	100%	310	100%
Zona de origen de aguas subterráneas (gobierno de Australia)	455	99%	445	98%
Receta softwash - IX R (Contratista de servicios de remediación)	1570	63.6%	54.9	100%
Aguas residuales derivadas de la remediación (Aviación)	1590	90%	1088	98%
Soluciones C6 AFFF usados (petróleo y gas)	4620	83%	6	71%
Aguas residuales derivadas de la remediación (Contratista de servicios de remediación)	10700	99%	6572	100%
Concentrado/Producto de 3M AFFF (petróleo y gas)	6380000	58%	5837000	62%

Fuente: AECOM 2019

## 4. LOS TRENES DE TRATAMIENTO

Los trenes de tratamiento combinan tecnologías o técnicas de pre-tratamiento en secuencia con tecnologías de destrucción para maximizar la destrucción de desechos de COP de un sitio contaminado. Los siguientes ejemplos combinan aspectos de las técnicas de pre-tratamiento delineadas con las tecnologías de destrucción descritas en la sección anterior.

### 4.1 CASO 1: SPEARS Y RIDS

Fue la NASA la que desarrolló este sistema de remediación de dos etapas para los sedimentos impactados por los PCB, la dioxina y otros COP clorados para limpiar algunos de sus anteriores sitios de operaciones y actualmente ha otorgado la licencia para su comercialización a ecoSPEARS<sup>39</sup>, una compañía basada en Estados Unidos. Se diseñó el proceso para remediar pasivamente los sedimentos contaminados además de otros ambientes acuáticos costeros. A diferencia del método que se utiliza más comúnmente, que es el dragado, el cual daña físicamente el hábitat bentónico y muchas veces resulta en una re-suspensión de los COP dentro de la columna de agua que lleva a una mayor biodisponibilidad para la biota, tiene la ventaja de que lleva a una perturbación mínima de la forma bentónica. En casos en donde la topografía pueda tener significancia cultural, como las playas que tienen un valor espiritual para los pueblos indígenas, se pueden remediar los sedimentos sin recurrir a la excavación ni dañar la topografía.

#### ***Etapa 1***

El Sistema de Remediación y Extracción de Polímeros Sorbentes (SPEARS por sus siglas en inglés) consiste en unas 'pipetas' o estacas huecas hechas de polímeros, que se encajan, en rejillas, en los sedimentos, penetrando hasta unos 400mm. Las pipetas están rellenas de una solución patentada. Se combina la naturaleza hidrofóbica de los COP clorados y su atracción hacia los polímeros para atraer los COP que se encuentran en los sedimentos a la superficie de las pipetas. Con el tiempo, se absorben los COP a través de la capa externa de polímeros, llegando a la solución líquida que se encuentra dentro de las pipetas. Cada pipeta tiene una zona de influencia de 100mm en todas direcciones. Cuando se les ordena en

---

<sup>39</sup> <https://ecospears.com/>



**Figura 19. Sistema de extracción y remediación de polímeros absorbentes.**

Fuente: ecoSPEARS

rejillas espaciadas de manera adecuada, se pueden extender los conglomerados de pipetas para abarcar grandes extensiones.

Después de varios meses, se pueden analizar los sedimentos para determinar si se han cumplidos los criterios de remediación y se han absorbido suficientes COP de los sedimentos. En caso de ser necesario, se pueden dejar las pipetas in-situ por más tiempo.

## ***Etapas 2***

Una vez alcanzada la meta de la remediación, se retiran las pipetas y se les envía a la segunda parte del tren de tratamiento, el Sistema de Deshalogenación Reductiva Integrada (RIDS por sus siglas en inglés), en el cual se decanta la solución y se le somete a la deshalogenación.

El componente RIDS del sistema es una instalación ex-situ que utiliza una forma patentada de reducción alcalina de metales para deshalogenar los COP que absorbieron las pipetas del sedimento hacia la solución.

## **4.2 CASO 2: LA UNIDAD DE DESORCIÓN TÉRMICA INDIRECTA (UDTI) Y LA DESCOMPOSICIÓN CATALIZADA POR BASES (DCB)**

En este caso, se unió una UDTI con un proceso de DCB, con el fin de concentrar y posteriormente destruir los desechos de los COP provenientes de una remediación parcial de una anterior planta de fabricación de productos químicos en Spolana, República Checa. El complejo químico

de Spolana está ubicado a 25 kilómetros al norte de Praga sobre el Río Elba y manufacturaba productos químicos y plaguicidas basados en cloro, incluyendo pentaclorofenol y 2,4,5-T. Debido a la tecnología utilizada en la producción de los plaguicidas clorados, se dio una fuerte contaminación tanto del producto como del sitio con dioxina y específicamente con los congéneres más tóxicos 2,3,7,8-TCDD (Holoubek *et al.*, 2007).

### ***Etapa 1***

Con el paso del tiempo, los edificios, los mantos freáticos y la tierra sitio se contaminaron con dioxinas, plaguicidas y toneladas de desechos contaminados procedentes del proceso, los cuales se almacenaron en muy malas condiciones. El gobierno tomó la decisión de utilizar una unidad de desorción térmica indirecta para tratar las grandes cantidades de residuos, incluyendo los escombros y la tierra contaminados. Se colocaron los materiales de desecho en la unidad y se calentaron por medios indirectos, liberando así COP y un fino polvo de minerales que se capturó a través de los filtros de la UDTI. La torta filtrante and el polvo ciclónico proveniente de las unidades de depuración de la UDTI capturaron la mayor parte de la contaminación de dioxinas y plaguicidas arrancada de la tierra y los escombros.

### ***Etapa 2***

Se trataron los desechos de la depuración en la unidad de DCB para deshalogenar los contaminantes. El proceso de la DCB involucra el tratamiento de desechos en la presencia de una mezcla de reactivos conformada por aceite donante de hidrógeno, un hidróxido de metales alcalinos y un catalizador patentado. Cuando se calienta la mezcla a más de 300°C, el reactivo produce hidrógeno atómico altamente reactivo. El hidrógeno atómico reacciona con los desechos para eliminar los elementos constitutivos que le confieren toxicidad a los compuestos.

Los residuos resultantes del proceso de la DCB forman un lodo libre de dioxinas que contiene primordialmente agua, sal, aceite donante de hidrógeno sin utilizar y residuos de carbono; se pueden utilizar estos residuos en rellenos sanitarios y como aceite mineral que se puede reciclar en el proceso para su uso en lotes subsiguientes. La combinación de las tecnologías de la UDTI y la DCB probaron ser muy efectivas para la destrucción de dioxinas, HCB y otros COP presentes en los desechos de Spolana. Se reportaron altos niveles de eficiencia de destrucción, los cuales se resumen en las tablas que siguen a continuación.

Para el proceso de la DCB, las cantidades residuales de PCDD/PCDF en el aceite resultante fueron menores a 0.016 ng TEQ/g y el hexacloroben-



**Figura 20. Unidad de Desorción Térmica Indirecta (UDTI) de Spolana en Neratovice.** Fuente: Arnika Association

**TABLA 9. EL PROCESO DCB PARA LA DESTRUCCIÓN DE DIOXINAS - DEMOSTRACIÓN A ESCALA PILOTO EN SPOLANA, NERATOVICE.**

<b>Material</b>	<b>Entrada ng/kg I-TEQ</b>	<b>Salida de matriz de aceites ng/kg I-TEQ</b>
Desechos químicos	209,000	0 (valor reportado)
Desechos químicos	200,000	4,3
Desechos químicos	11,000	0,23
Desechos químicos	47,000	0
Desechos químicos	35,000	0
Polvo	1,620,000	0,52
Desechos químicos	78,000	0
Concentrado acuoso	96,000	0
Concentrado orgánico	876,000	0

Fuente: Kubal, Fairweather et al. 2004

**TABLA 10.** DESTRUCCIÓN DE HEXACLOROBENZENO (HCB) Y LINDANO EN EL PROCESO DE DCB

Material	Entrada ng/kg I-TEQ		Salida ng/kg I-TEQ	
	HCB	Lindano	HCB	Lindano
Tierra	2,643	1.34	< 1.0	< 1.0
Ladrillo y concreto	49,000	11	< 1.0	< 1.0
Concreto	5,100	18	< 1.0	< 1.0
Yeso	270	< 1.0	< 1.0	< 1.0

Fuente: Kubal, Fairweather et al. 2004

zeno (HCB) fue  $< 0.2 \mu\text{g/g}$ . Los niveles de PCDD/PCDF en el proceso de descarga de gases (la combinación de la descarga de gases proveniente del tratamiento de la tierra y los reactivos de la DCB) variaron entre  $0.013$  y  $0.031 \text{ ng TEQ/Nm}^3$ ; para los PCB fue de entre  $0.005$  y  $0.0014 \text{ ng TEQ/Nm}^3$ ; para el HCB, entre  $< 6.7$  y  $187 \text{ ng/Nm}^3$ ; y para  $\Sigma$  de los plaguicidas organoclorados, entre  $17$  y  $235 \mu\text{g/Nm}^3$  (Holoubek 2006).

El extensivo monitoreo de la atmósfera durante la remediación indicó que las actividades de remediación causaron un aumento significativo (de un orden de magnitud de hasta 1.5) en la contaminación por COP de la atmósfera tanto en el interior de la fábrica como en las áreas vecinas circundantes. Sin embargo, las emisiones de dioxinas provenientes de la unidad de DCB plenamente operativa, fueron de  $0.0017$ – $0.0424 \text{ ng TEQ m}^3$  (Veverka, Čtvrtníčková et al. 2004) indicando que había una gran probabilidad de que se dieran altas concentraciones en la atmósfera debido a la excavación y las obras en el sitio combinadas con la volatilización de COP de la contaminación de la tierra. Esto está señalando la necesidad de una evaluación cuidadosa de las potenciales emisiones fugitivas provenientes de las obras de remediación realizadas en el sitio.

**TABLA 11.** DESCOMPOSICIÓN DE HEXACLOROBENCENO Y LINDANO A TRAVÉS DEL PROCESO DE DCB DURANTE OPERACIÓN PILOTO EN SPOLANA, NERATOVICE.

Material	Entrada mg/kg		Salida de matriz de aceites mg/kg	
	HCB	Lindano	HCB	Lindano
Desechos químicos	29,000	1,500	< 1.0	< 1.0
Desechos químicos	200,000	900	< 2.0	< 2.0
Desechos químicos	550,000	1,000	< 2.0	< 2.0
Desechos químicos	270,000	1,000	< 2.0	< 2.0
Desechos químicos	160,000	1,000	< 2.0	< 2.0
Polvo	7,600	7	< 2.0	< 2.0
Desechos químicos	1,598	19,000	< 2.0	< 2.0
Concentrado acuoso	630	< 2.0	< 2.0	< 2.0
Concentrado orgánico	11,000	< 2.0	< 2.0	< 2.0

Fuente: Kubal, Fairweather et al. 2004

**TABLA 12.** CONCENTRACIONES DE PCDD/F EN INSUMOS Y PRODUCTOS DE TECNOLOGÍAS DE DTI Y DCB EN SPOLANA, NERATOVICE.

Matriz	Niveles de PCDD/PCDF [TEQ ng/g]			
	Tecnología			
	DTI/DCB		DCB	
	entrada	salida	entrada	salida (aceite)
Concreto	4780	0,066		
Tierra	45	0,0030		
Concentrado acuoso de DTI			96170	0
Desechos químicos			209	0

Fuente: Kraitr, Richtr et al. 2006

# 5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Es entendible que a mediados del siglo XX, con la falta de alternativas existente, se hubiera recurrido a la incineración para destruir los COP, muchos de los cuales eran sustancias químicas novedosas en esa época, cuyas consecuencias no quedaban claras en ese entonces. Sin embargo, para la década de los años ochenta, ya quedaba claro que la incineración de los desechos clorados de COP llevaba a una significativa emisión de dioxinas y otros COPNI. Esta revelación debería de haber sido una oportunidad para que tanto los gobiernos como la industria se re-enfocaran en las tecnologías alternativas a la combustión que estaban emergiendo y apoyaran su desarrollo acelerado. En vez de esto, el sector de la incineración intensificó su trabajo de cabildeo político, proclamó toda una gama de avances técnicos para minimizar las emisiones de COPNI y aprovechó su dominio del mercado de la gestión de desechos para promover una eliminación relativamente económica de desechos de COP. La tecnología alternativa a la combustión se siguió desarrollando rápidamente, aunque enfrentó importantes barreras para entrar al mercado impuestas por la estancada industria de la incineración. Finalmente, se reconocieron los beneficios de la tecnología alternativa a la combustión, incluyendo la destrucción efectiva de COP, la no creación de COPNI, la no producción de cenizas tóxicas, la movilidad y la aceptación comunitaria. A pesar de las décadas desaprovechadas, se ha refinado y comercializado una variedad de sofisticadas tecnologías alternativas a la combustión para la destrucción de una amplia gama de desechos de COP y la limpieza de sitios contaminados. Con la continua adición de nuevos COP a los anexos del Convenio de Estocolmo, están creciendo rápidamente las existencias de desechos de COP. Se trata de una oportunidad ideal para que los países desarrollados implementen una amplia escala de tecnologías alternativas a la combustión y rompan el ciclo de los COPNI que promueve la incineración.

Para los países en desarrollo y las economías en transición, representa una oportunidad para dejar atrás la incineración y el ciclo de COPNI y avanzar directamente hacia tecnologías limpias para la destrucción de COP. Tanto las políticas internacionales como las agencias internacionales de financiación deberían de aprovechar esta oportunidad para promover metas de desarrollo sostenible a través del desarrollo de capacidades y mecanismos para transferir tecnologías alternativas a la combustión a los países que



más las necesitan y que no cuentan con suficientes recursos para la destrucción de existencias de COP.

Este informe demuestra que la incineración no ha resuelto los problemas de las emisiones de los COPNI y en el mejor de los casos, ha transferido estos contaminantes a vastos volúmenes de cenizas residuales que finalmente se pierden en el medio ambiente. En el peor de los casos, los incineradores crean cenizas contaminadas y, a la vez, siguen operando con emisiones ocultas de COPNI.

Este informe también confirma que la tecnología alternativa a la combustión ha alcanzado un punto de madurez en el cual los diferentes enfoques que se aplican logran gestionar prácticamente todas las formas de desechos de COP. El campo está evolucionando de manera continua con nuevas e innovadoras combinaciones de tecnologías y técnicas que de manera sostenible pueden destruir o convertir desechos de COP.

### ***IPEN recomienda:***

- El reconocimiento por parte de la comunidad internacional que se dedica a formular políticas ambientales, de las tecnologías alternativas a la combustión como una solución sostenible a largo plazo para las existencias de desechos de COP en el mundo, dando prioridad a la expansión de dicho sector.
- La rápida expansión de la transferencia de tecnologías y de capacitación para el establecimiento de tecnologías alternativas a la combustión, en los países en desarrollo y las economías en transición, con el fin de destruir las existencias de COP, por parte de los organismos financieros que se dedican al medio ambiente mundial y los países desarrollados.
- La instalación de un Centro Global de Excelencia en Alternativas a la Combustión, con la participación conjunta de los Convenios de Estocolmo y de Basilea, con el fin de exhibir los desarrollos tecnológicos, y junto con las autoridades nacionales, construir capacidades para lidiar con las existencias de COP.
- El fin a las inversiones, subsidios y demás apoyos, dirigidos a la industria de la incineración de los desechos COP, incluyendo los créditos para la inversión en energías renovables.
- El reconocimiento por parte de la comunidad internacional que se dedica a formular políticas ambientales, de que la incineración no es una tecnología adecuada ni sostenible para la destrucción de COP, debido a que genera COPNI.

- El dejar de promover la incineración como una tecnología adecuada para la destrucción de desechos de COP, por parte de los organismos subsidiarios o directrices de los Convenios de Estocolmo, de Basilea o de otro Convenio.
- El discontinuar la promoción y la financiación de la incineración por parte de instituciones financieras internacionales, como el Banco Mundial y el Foro Económico Mundial, con el fin de enfocarse en la implementación de tecnologías alternativas a la combustión.

# REFERENCIAS

- AECOM (2019) DE-FLUOROTM Demonstration programme results. [https://www.aecom.com/au/wp-content/uploads/2019/11/DE-FLUORO-Demonstration-Program-Report\\_Industry\\_Reduced-for-web.pdf](https://www.aecom.com/au/wp-content/uploads/2019/11/DE-FLUORO-Demonstration-Program-Report_Industry_Reduced-for-web.pdf)
- Aki, S.N.V.K, (1998) An Economic Evaluation of Catalytic Supercritical Water Oxidation: Comparison with Alternative Waste Treatment Technologies *Environmental Progress* (Vol.17, No.4)
- Ariuzumi, A., T. Otsuka, M. Kamiyama and M. Hosomi (1997). "Dechlorination and decomposition behaviour of PCBs by the sodium dispersion process." *J. Environ. Chem.* 7: 793-799.
- Arkenbout, A. (2018) Hidden emissions: A story from the Netherlands. Case study. Toxicowatch Netherlands and Zero Waste Europe. <https://zerowasteurope.eu/downloads/hidden-emissions-a-story-from-the-netherlands>
- Artiola, J.F. (2019) Industrial Waste and Municipal Solid Waste Treatment and Disposal in *Environmental and Pollution Science* (Third Edition), 2019
- Bell, L., and Bremmer, J., (2013) Burning Waste for Energy – It Doesn't Stack Up. National Toxics Network Australia <http://www.ntn.org.au/wp/wp-content/uploads/2013/11/NTN-waste-to-energy-incineration-report-2013.1.pdf>
- Birke, V. and Brodowski, M. (2002) Economic and ecologically favorable detoxification of polyhalogenated pollutants applying the DMCR technology, in: *International Workshop on Mechanochemical Processes for the Environment Science and Industrial Applications*, Metea Research Center, Bari, Italy, 2002
- Borgnes, D and Rikheim, B. 2005. Emission Measurements During Incineration of Waste Containing Bromine". Norden, 2005. Available at: <http://norden.divaportal.org/smash/get/diva2:702261/FULLTEXT01.pdf>
- Cagnetta, G., Robertson, J., Huang, J., Zhang, K., Yu, G. (2016a) Mechanochemical destruction of halogenated organic pollutants: A critical review. *Journal of Hazardous Materials* 313 (2016) 85-102 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.076>
- Cagnetta, G., Hassan, M., Huang, J., Yu, G., Weber, R. (2016b) Dioxins reformation and destruction in secondary copper smelting fly ash under ball milling, *Sci.Rep.* 6 (2016) 1-13 <http://dx.doi.org/10.1038/srep22925>.
- CMPS&F – Environment Australia (1997). Appropriate Technologies for the Treatment of Scheduled Wastes. Review Report Number 4. Available at [www.deh.gov.au](http://www.deh.gov.au)
- Cobo, M., A. Gálvez, J. Conesa and C. Montes de Correa (2009). "Characterization of fly ash from a hazardous waste incinerator in Medellín, Colombia." *Journal of Hazardous Materials* 168: 1223-1232
- Costner, P., D. Luscombe and M. Simpson (1998). Technical Criteria for the Destruction of Stockpiled Persistent Organic Pollutants, Greenpeace: 45
- DANCEE (2004). Detailed Review of Selected Non-Incineration and Incineration POPs Elimination Technologies for the CEE Region. Copenhagen, Danish Environmental Protection Agency – DANCEE: 185.
- Du Bing, Y.-r. Huang, A.-m. Liu, T. Zhang, Z.-g. Zhou, N. Li, L.-l. Li, Y. Ren, P.-j. Xu and L. Qi 2011. "Selected Brominated UP-POPs from Cement Kiln Co-processing Hazardous Waste." *Organohalogen Compounds* 73.
- Duffy, G.J. and C.J.R. Fookes, 1997. Development of a Catalytic Process for the Regeneration of Transformer Oils and the Destruction of Chlorinated Hydrocarbons. Presented at the *I&EC Special Symposium*, American Chemical Society, Pittsburgh, Pennsylvania, September 15-17, 1997.
- Environmental Working Group (2018) Up To 110 Million Americans Could Have PFAS-Contaminated Drinking Water. <https://www.ewg.org/research/report-110-million-americans-could-have-pfas-contaminated-drinking-water>

European Commission, 2013. Best Available Techniques (BAT). *Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Joint Research Centre. Institute for prospective technological studies.

GEF/UNDP (2015) Independent Expert Evaluation of Three Pilot/Laboratory Scale Technology Demonstrations on Dioxin Contaminated Soil Destruction from the Bien Hoa Airbase in Viet Nam.

GEF (2017) Compilation of Comments Submitted By Council Members on the GEF November 2017 Work Program. <https://www.thegef.org/sites/default/files/work-program-documents/Compilation%20of%20Council%20Comments%20-%20November%202017%20Work%20Program.pdf>

German Federal Environment Agency, 2015. Identification of potentially POP-containing Wastes and Recyclates – Derivation of Limit Values. Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/identification-of-potentially-pop-containing-wastes>

Goto, M., Sasaki, M. & Hirose, T. Reactions of polymers in supercritical fluids for chemical recycling of waste plastics. *J Mater Sci* 41, 1509–1515 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10853-006-4615-2>

Gomez-Ruiz, B., Gómez-Lavín, S., Diban, N., Boiteux, V., Colin, A., Dauchy, X., & Urtiaga, A. (2017). Efficient electrochemical degradation of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) from the effluents of an industrial wastewater treatment plant. *Chemical Engineering Journal* (Lausanne), 322, 196–204.

Haglund P. (2007). Methods for treating Soils contaminated with Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins, Dibenzofurans, and other polychlorinated Aromatic Compounds. *Ambio* 36(5), 467–474.

Hogg, D., (2006) “A Changing Climate for Energy from Waste?” *Eunomia Research and Consulting*. May 2006.p 21.

Holoubek, I. (2006). Oral presentation of the data from remediation of contaminated site in Spolana Neratovice, by using ITDU and BCD technologies. Presented by expert nominated by the Czech Republic. BAT/BEP Expert Group meeting, December 2006, Geneva.

Holoubek, I., Klanová, J. and Čupr, P. (2007) Remediation of the Spolana Neratovice. Proceedings 9th International HCH and Pesticides Forum for CEECCA Countries. September 20–22, 2007 Chisinau, Republic of Moldova. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MD2009100141>

Hosomi, M. (2006). Data about U-POPs releases for eight processes that have identified the Basel Convention to treat PCB wastes.

Institute for Global Environmental Strategies (IGES) (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

IHPA, 2002. IHPA and North Atlantic Treaty Organization (NATO) Committee on the Challenges of Modern Society (CCMS) Pilot Study Fellowship Report: “Evaluation of Demonstrated and Emerging Remedial Action Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III).” Online Address: <http://www.iropa.info/resources/library/>.

JESCO (2009) Kitakyushu PCB Waste Treatment Facility, Japan Environmental Safety Corporation, Available at: [www.jesconet.co.jp/eg/facility/kitakyushu.html](http://www.jesconet.co.jp/eg/facility/kitakyushu.html).

JESCO, 2013. Hokkaido PCB Waste Treatment Facility, Japan Environmental Safety Corporation Available at: [www.jesconet.co.jp/eg/facility/hokkaido.html](http://www.jesconet.co.jp/eg/facility/hokkaido.html)

JESCO. (2009a). “Osaka PCB Waste Treatment Facility, Available at [www.jesconet.co.jp/eg/facility/osaka.html](http://www.jesconet.co.jp/eg/facility/osaka.html).”

Juwarkar AA, Misra RR, Sharma JK (2014) Recent trends in bioremediation. In *Geomicrobiology and biogeochemistry*. Springer, Berlin Heidelberg, pp 81–100

Kajiwara, N., Noma, Y., Sakai, S. (2017) Environmentally sound destruction of hexabromocyclododecanes in polystyrene insulation foam at commercial-scale industrial waste incineration plants. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (2017) 3572–3580

Kalogirou, E. (2012), The development of WtE as an integral part of the sustainable waste management worldwide, Recuwatt - Recycling and Energy conference-, Mataró (Spain), 4th October 2012.

Karstensen, K.H., (2008) Guidelines for treatment of hazardous wastes and co-processing of AFRs in cement kilns. Prepared for the Department for Environmental Affairs and Tourism, Republic of South Africa. Available at: <http://sawic.environment.gov.za/documents/461.pdf>.

Kubal, M., J. Fairweather, P. Crain and M. Kuraš (2004). Treatment of solid waste polluted by polychlorinated contaminants (pilot-scale demonstration). *International Conference on Waste Management and the Environment No2*. S. WIT Press, ROYAUME-UNI (2004) (Monographie). Rhodes, WIT Press: 13-23.

Kraitr, M., V. Richtř and V. Sirotek (2006). "Unieszkodliwanie dioksyn (PCDDs/PCDFs) ze starych obciężań środowiska za pomocą technologii zasadowego rozkładu katalitycznego (BCD). Disposal of Polychlorinated Dioxin Compounds (PCDDs/PCDFs) from Old Environmental Load by the Base Catalysed Decomposition (BCD) Technology." *Chemia - dydaktyka - ekologia - metrologia* 11(1-2): 35-41.

Kubatova A, Erbanova P, Eichlerova I, Homolka L, Nerud F, Šašek V (2001) PCB congener selective biodegradation by the white rot fungus *Pleurotus ostreatus* in contaminated soil. *Chemosphere* 43(2): 207-215

Kümming, K. *et al.*, (2001) "Gas-phase chemical reduction of hexachlorobenzene and other chlorinated compounds: Waste treatment experience and applications", 6th International HCH & Pesticides Forum Book, pp. 271-275. Available from: [http://www.hchforum.com/6th/forum\\_book/](http://www.hchforum.com/6th/forum_book/).

Kümming, K. E., Gray D.J., Power J.P., Woodland S.E., (2002) Gas-phase chemical reduction of hexachlorobenzene and other chlorinated compounds: Waste treatment experience and applications, *6th Int. HCH & Pesticides Forum, 20-22 March 2001*, Poznan, Poland, February 2002. [http://www.hchforum.com/6th/forum\\_book/A.5.6.pdf](http://www.hchforum.com/6th/forum_book/A.5.6.pdf)

Lee, J. W., Lee, J.-W., Kim, K., Shin, Y.-J., Kim, J., Kim, S., ... Park, K. (2017). PFOA-induced metabolism disturbance and multi-generational reproductive toxicity in *Oryzias latipes*. *Journal of Hazardous Materials*, 340, 231-240.

Li, Y *et al.*, (2012). Disposal of obsolete pesticides including DDT in a Chinese cement plant as blueprint for future environmentally sound co-processing of hazardous waste including POPs in cement industry, *Procedia Environmental Sciences*, vol. 16, pp 624-627.

Liang S, Pierce D, Lin H, Chiang D, Huang Q. (2018) Electrochemical oxidation of PFOA and PFOS in concentrated waste streams. *Remediation*. 2018;28:127-134. <https://doi.org/10.1002/rem.21554>

Liu, G. *et al.*, (2016) Distributions, profiles and formation mechanisms of polychlorinated naphthalenes in cement kilns co-processing municipal waste incinerator fly ash, *Chemosphere*, vol. 155, pp 348-357.

Liu, Y., Fan, C., Zhang, H., Zou, J., Zhou, F. and Jin, H. (2019) The resource utilization of ABS plastic waste with subcritical and supercritical water treatment, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 30, 2019, Pages 15758-15765, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.012>.

Mark, F.E., Vehlou, J., Dresch, H., Dima, B., Gruttner, W., Horn, J. Destruction of the flame retardant hexabromocyclododecane in a full-scale municipal solid waste incinerator. *Waste Management & Research*. 2015, 33, 165-174.

Marrone, P. A. (2013) "Supercritical water oxidation—Current status of full-scale commercial activity for waste destruction." *J. of Supercritical Fluids* 79: 283-288.

Marrone, P.A. and Hong, J.T., (2007) "Supercritical Water Oxidation", in *Environmentally Conscious Materials and Chemicals Processing*, Myer Kutz, ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 385-453.

McDowall, R., Boyle, C. and Graham, B. (2004). Review of emerging, innovative technologies for the destruction and decontamination of POPs and the identification of promising technologies for use in developing countries. GF/8000-02-02-2205, United Nations.

Ministry of the Environment of Japan (2004). Report on study of the treatment standards for POPs waste in fiscal year 2003.

Mino, Y. and Y. Moriyama (2001) Possible Remediation of Dioxin-Polluted Soil by Steam Distillation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2001. 49(8): p. 1050-1051.

Montero, G. A., Giorgio, T. D., and Schnelle, K. B. (1996) Scale-up and economic analysis for

the design of supercritical fluid extraction equipment for remediation of soil. *Environmental Progress* 15(2), 112-121.

Nordén, M., Berger, U., & Engwall, M. (2016). Developmental toxicity of PFOS and PFOA in great cormorant (*Phalacrocorax carbo sinensis*), herring gull (*Larus argentatus*) and chicken (*Gallus gallus domesticus*). *Environmental Science & Pollution Research*, 23(11), 10855–10862.

Noma, Y., T. Muramatu, K. Nishizawa, M. Ohno and S.-I. Sakai (2002). “Dechlorination pathways of PCBs by photochemical reaction and catalytic hydro-dechlorination.” *Organohalogen compounds* 56: 413-416.

Ocelka, T. (2017). Characterisation and perspectives of novel method for dehalogenation of POPs: Chemical Destruction using Copper (CDC).

Ocelka, T., S. Nikl, R. Kurkova and L. Pavliska (2011). Application of Copper Mediated Destruction technology for trial dehalogenation of pesticides concentrates in Jaworzno dump site in mobile full scale unit. *11th HCH and Pesticides Forum*. Baku, Azerbaijan. Session 13: POPs management and destruction.

Ocelka, T., V. Pekárek, E. Fišerová, M. Abbrent, J. Kohutová, J. Hettflejš and M. Lojkásek (2010). “Copper mediated destruction (CMD) – a novel BAT technology for POPs destruction.” *Organohalogen Compd* 72: 1258-1259.

Pankow, J. F., and Cherry, J. A., Eds. (1996) Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Ground Water. Waterloo Press, Portland, Ore.

Piersol, P. (1989) The Evaluation of Mobile and Stationary Facilities for the Destruction of PCBs. *Environment Canada Report* EPS 3/HA/5, May 1989.

Petrlík, J. and R. Ryder (2005). After Incineration: The Toxic Ash Problem. Prague, Manchester, IPEN Dioxin, PCBs and Waste Working Group, Arnika Association: 59 Available at: [http://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen\\_incineration\\_ash-en.pdf](http://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_incineration_ash-en.pdf).

Petrlík, J. and Bell L. (2017) Toxic ash poisons the food chain. IPEN, Anika Association, National Toxics Network. Prague, Berkeley and Perth. [https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-toxic-fly-ash-in-food-v1\\_4a-en-web.pdf](https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-toxic-fly-ash-in-food-v1_4a-en-web.pdf)

PeroxyChem (2019) PeroxyChem Technical Bulletin ISCR Treatment of Pesticides. <http://www.peroxychem.com/media/156160/PeroxyChem-Technical-Bulletin-ISCR-Treatment-of-Pesticides.pdf>

Rahuman, M.S.M. *et al.* (2000) “Destruction Technologies for Polychlorinated Biphenyls (PCBs)”, ICS-UNIDO. Available from: [https://clu-in.org/download/remed/destruct\\_tech.pdf](https://clu-in.org/download/remed/destruct_tech.pdf)

Ross, I., McDonough, J., Miles J, *et al.* (2018) A review of emerging technologies for remediation of PFASs. *Remediation*. 2018;28:101-126. <https://doi.org/10.1002/rem.21553>

Rubin, E. and Y. Burhan (2006) Non-combustion technologies for remediation of persistent organic pollutants in stockpiles and soil. *Remediation Journal*, 2006. 16(4): p. 23-42.

Sato, T., *et al.*, (2010) Behavior of PCDDs/PCDFs in remediation of PCBs-contaminated sediments by thermal desorption. *Chemosphere*, 2010. 80(2): p. 184-189.

Schwille, F., (1988) *Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media: Model Experiments*. Translated from the German by J. F. Pankow. Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.

Searchinger, T., Hamburg, S., Melillo, J., Chameides, Havlik, P., Kammen, D., Likens, G., Lubowski, R., Obersteiner, M. Oppenheimer, M., Robertson, P., Schlesinger, W. and Tilman, D. (2009) Fixing a Critical Climate Accounting Error *Science* Vol 326 23 October 2009.

Sharma, Jitendra K; Gautam, Ravindra K; Nanekar, Sneha V; Weber, Roland; Singh, Brajesh K; *et al.* (2018) Advances and perspective in bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils *Environmental Science and Pollution Research International*; Heidelberg Vol. 25, Iss. 17, (Jun 2018): 16355-16375. DOI:10.1007/s11356-017-8995-4

Shimme, K., Takase, K., Deguchi, Y., Okawa, A., Mizuno, M., Saito, F., *et al.* (2008) Detoxification of POPs wastes, dioxin, PCB and agricultural chemicals by mechanochemical principle, in: *9th International HCH and Pesticides Forum for CEECCA Countries*, Chisinau, Republic of Moldova, 2008.

SCP/RAC (2020) Plastic's Toxic Additives and the Circular Economy, Barcelona Regional Activity Centre for Sustainable Consumption and Production <http://www.cprac.org/en/news-archive/general/toxic-additives-in-plastics-hidden-hazards-linked-to-common-plastic-products>

Smith, Brown, *et al.*, "Waste Management Options and Climate Change: Final report to the European Commission, DG Environment: Executive Summary," July 2001.

SNC Lavalin Inc. (2008). PCB Management and Disposal Demonstration Project. Analysis of PCB Treatment & Disposal Options for the Socialist Republic of Vietnam. Final Report to The World Bank, July 2008.

STAP GEF (2004) *Review of emerging, innovative technologies for the destruction and decontamination of POPs and the identification of promising technologies for use in developing countries*. The Scientific and Technical Advisory Panel of the GEF United Nations Environment Programme. Final – GF/8000-02-02-2205

Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C., & Allen, J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(2), 131-147. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>

Svoboda, D., (2013) Adjusting monitoring assessment and remediation measures to the real exposure scenarios, in Proceedings for workshop "Sharing Lessons - Learned: Dioxin/POPs Pollution Assessment and Remediation in Vietnam". Project "Environmental Remediation of Dioxin Contaminated Hotspots in Vietnam", L.K. Son and N.M. Hang, Editors. 2013, Office of National Steering Committee 33, Ministry of Natural Resources and Environment, Vietnam; Da Nang, Vietnam. p. 51-55.

Tagashira S., Takahashi M., Shimizu Y., Osada M., Mikata N., Yamazaki R., (2007) "Plasma Melting technology of PCB-contaminated Wastes", *Organohalogen Compounds*, vol. 69, pp. 662-665.

Tauw (2020) Full-sized Project to Implement an Environmentally Sound Management and Final Disposal of PCBs in the Republic of Serbia. Technology selection tool for PCB contaminated soil. September 2020.

Trautmann, A., Schell, H., Schmidt, K., Mangold, K.-M., & Tiehm, A. (2015). Electrochemical degradation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater. *Water Science & Technology*, 71(10), 1569-1575

Tu, L.-K., Y.-L. Wu, L.-C. Wang and G.-P. Chang-Chien (2011). "Distribution of polybrominated dibenzop-dioxins and dibenzofurans and polybrominated diphenyl ethers in a coal-fired power plant and two municipal solid waste incinerators." *Aerosol and Air Quality Research* 11(5): 596-615.

UNEP (1995b) Technical Guidelines on Incineration on Land (D10). Available from: [www.basel.int](http://www.basel.int).

UNEP (2000) Survey of Currently Available Non-Incineration PCB Destruction Technologies. Available from: [www.chem.unep.ch](http://www.chem.unep.ch).

UNEP (2000a) Basel technical guidelines on hazardous wastes-Physico-Chemical Treatment/Biological Treatment. Available from: [www.basel.int](http://www.basel.int).

UNEP (2004a) Review of the Emerging, Innovative Technologies for the Destruction and Decontamination of POPs and the Identification of Promising Technologies for Use in Developing Countries. Available at: [archive.basel.int/techmatters/review\\_pop\\_feb04.pdf](http://archive.basel.int/techmatters/review_pop_feb04.pdf).

UNEP (2004b) Inventory of World-wide PCB Destruction Capacity. Second Issue, December 2004

UNEP (2004c) POPs Technology Specification Data Sheet: Hazardous Waste Incineration. Available at: [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/DEFBSCLoگو\\_Inciner\\_180608\\_.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/DEFBSCLoگو_Inciner_180608_.pdf).

UNEP (2013a) Framework for the environmentally sound management of hazardous wastes and other wastes. UNEP/CHW.11/3/Add.1/Rev.1. Available at: <http://www.basel.int/Implementation/CountryLedInitiative/EnvironmentallySoundManagement/ESMFramework/tabid/3616/Default.aspx>

UNEP 2020 General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. <http://www.basel.int/implementation/popswastes/technicalguidelines/tabid/5052/default.aspx>

UNEP – EG BAT/BEP (2006) Annex II: Response to the request by the Conference of the Parties to the Basel Convention at its seventh meeting. Report of the second meeting of the Expert Group on Best Available Technologies and Best Environmental Practices. Geneva.

UNIDO (2007) Non-combustion Technologies for POPs Destruction Review and Evaluation. United Nations Industrial Development Organization (eds. Sergey Zinoviev, Paolo Fornasiero, Andrea Lodolo, Stanislav Miertus).

UNIDO (2010) Persistent organic pollutants: contaminated site investigation and management toolkit. Available from: <http://www.unido.org/index.php?id=1001169>.

United States Army Corps of Engineers (2003) Safety and Health Aspects of HTRW Remediation Technologies: Engineer Manual. Available at: [http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM\\_1110-1-4007\\_sec/EM\\_1110-1-4007.pdf](http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM_1110-1-4007_sec/EM_1110-1-4007.pdf)

US Federal Register (2010) Draft Recommended Interim Preliminary Remediation Goals for Dioxin in Soil at CERCLA and RCRA Sites. *Federal Register* Thursday, January 7, 2010 / Notices, 2009. 75(4).

United States Environmental Protection Agency (1997) *Treatment technology performance and cost data for remediation of wood preserving sites*. EPA/625/R-97/009.

United States Environmental Protection Agency (2000) *Data Quality Objectives Process for Hazardous Waste Site Investigations*. EPA QA/G-4HW Final, EPA/600/R-

00/007. Office of Environmental Information. Washington, D.C.

United States Environmental Protection Agency (2009), *Draft Guidance on Recommended Interim Preliminary Remediation Goals for Dioxin in Soil at Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) and Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Sites OSWER 9200.3-56 December 30, 2009*. 2009. p. 45.

United States Environmental Protection Agency (2010) Reference Guide to Non-combustion Technologies for Remediation of Persistent Organic Pollutants in Soil, Second Edition – 2010. United States Environmental Protection Agency. EPA 542-R-09-007. 103 p. <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryPDF.cgi/P1008PKH.PDF?Dockey=P1008PKH.PDF>

Varela, Juan & Oberg, Steven & Neustedter, Thomas & Nelson, Norvell. (2001). Non-Thermal organic waste destruction: Characterization of the CerOx system 4. *Environmental Progress*. 20. 261 - 271. 10.1002/ep.670200415.

Vermeulen I., Van Caneghem J., Block C., Baeyens J., Vandecasteele C. (2011) Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *J Hazard Mater* 190, 8-27.

Veverka, Z., L. Čtvrtníčková, L. Kašparová, L. Ládyš, J. Prokop, L. Ševčíková and L. Žitný (2004). Projekt Spolana – dioxiny. Odstranění starých ekologických zátěží. Dokumentace o hodnocení vlivů na životní prostředí (EIA report). Praha, BCD CZ, a.s.: 125.

Vijgen, J. (2002) "NATO/CCMS Pilot Study: Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater." Available at: <https://www.clu-in.org/download/partner/2001annualreport.pdf>.

Vijgen, J. (2003) Solvated Electron Technology (SET TM) John Vijgen, International HCH and Pesticides Association, Fellowship report: "New and emerging techniques for the destruction and treatment of pesticides wastes and contaminated soils." NATO/CCMS Pilot Study: Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III)"

Vijgen, J. and McDowall R, (2008) Catalytic Hydro-Dechlorination Method (CHD) Basel Convention technical fact sheet. [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/pops/june2009/sbc\\_chdfactsheet\\_111108\\_prov\\_sbclogo.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/pops/june2009/sbc_chdfactsheet_111108_prov_sbclogo.pdf)

Vijgen, J. (2014). Catalytic Dechlorination using Copper catalysis (CDC). Technology Factsheet.

Waltisberg, J. and Weber, R. (2020) Disposal of waste-based fuels and raw materials in cement plants in Germany and Switzerland. What can be learned for global co-incineration practice and policy? *Emerging Contaminants* 6 (2020) 93-102



Wang, L., L. W. J. H. Hsi, G. Chang-Chien and C. Chao (2009). "Characteristics of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/DFs) in the bottom and fly ashes of municipal solid waste incinerators." *Organohalogen Compounds* 71:

516-521.

Wang, M.-S., S.-J. Chen, Y.-C. Lai, K.-L. Huang and G.-P. Chang-Chien (2010). "Characterization of persistent organic pollutants in ash collected from different facilities of a municipal solid waste incinerator." *Aerosol Air Qual. Res* 10: 391-402. [http://www.aaqr.org/files/article/1207/10\\_AAQR-10-01-OA-0001\\_391-402.pdf](http://www.aaqr.org/files/article/1207/10_AAQR-10-01-OA-0001_391-402.pdf)

Weber, R. (2007) Relevance of PCDD/PCDF formation for the evaluation of POPs destruction technologies – Review on current status and assessment gaps, *Chemosphere*, Volume 67, Issue 9, 2007, Pages S109-S117,

ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.094>.

Yan, D., Peng, Z., Karstensen, KH., Ding, Q., Wang, K., and Wang, Z. (2014). "Destruction of DDT wastes in two preheater/precalciner cement kilns in China", *Science of the Total Environment*, vol. 476-477, pp. 250-257.

Zhang, K., Huang, J., Yu, G., Zhang, Q., Deng, S., & Wang, B. (2013). Destruction of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) by ball milling. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6471- 6477. <https://doi.org/10.1021/es400346n>

Zhang K, Huang J, Wang H, Liu K, Yu G, Deng S, and Wang B. (2014a) Mechanochemical degradation of hexabromocyclododecane and approaches for the remediation of its contaminated soil. *Chemosphere*. 2014 Dec;116 40-45. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.02.006. PMID: 24613442.

Zhang K, Huang J, Wang H, Yu G, Wang B, Deng S, Kanoband J, Zhang Q. (2014b) Mechanochemical destruction of decabromodiphenylether into visible light photocatalyst BiOBr. *RSC Advances* 4(28):14719-1472 DOI: 10.1039/c3ra47738j

Zhuo, Q., Deng, S., Yang, B., Huang, J., Wang, B., Zhang, T., & Yu, G. (2012). Degradation of perfluorinated compounds on a boron-doped diamond electrode. *Electrochimica Acta*, 77, 17–22.

Ziltek (2009) Rembind Product Overview. <https://rembind.com/uploads/Z070-15-RemBind-Product-Overview.pdf>



por un futuro sin tóxicos

[www.ipen.org](http://www.ipen.org)

[ipen@ipen.org](mailto:ipen@ipen.org)

[@ToxicsFree](#)