

(Editores)  
Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso

RECURSOS MINERALES Y  
MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA  
QUE GESTIONAR Y UN FUTURO  
QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020





# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES



Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso  
(editores)

*Recursos minerales y  
medioambiente: una herencia  
que gestionar y un futuro  
que construir*

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez



## Índice

PRÓLOGO .....	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

### SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable .....	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandio.</i>	

### ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular .....	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés .....	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado .....	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales .....	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps .....	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami &amp; D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático .....	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille &amp; J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias.....	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias .....	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular .....	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos .....	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería .....	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular .....	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía .....	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía .....	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española .....	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias .....	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo .....	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro .....	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx .....	391
<i>M. Suárez</i>	

# **PERSPECTIVAS SOBRE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE MERCURIO ORIGINADAS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA**

*M.<sup>a</sup> Rosa Martínez Tarazona, M.<sup>a</sup> Antonia López Antón y Roberto García*  
Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR), CSIC. Oviedo, España

## **RESUMEN**

Desde que se dispone de registros, la combustión de carbón ha sido la principal fuente de emisión de mercurio a la atmósfera en Europa y la segunda en el mundo, solamente por debajo de la minería artesanal del oro. Sin embargo, hasta el momento, no se ha conseguido reducir tales emisiones, sino que estas han ido en aumento cada año. Ello es debido a que, fundamentalmente por razones económicas, los sistemas identificados y desarrollados para el control de mercurio en la combustión, no han sido aplicados eficazmente, y a que el uso de combustibles fósiles se ha venido incrementando en la última década en muchas zonas del planeta.

En pleno 2020, las políticas energéticas y medioambientales están siendo cuestionadas y revisadas. Una vez probado el papel de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el cambio climático, y aunque a muy distintos niveles, la mayor parte de los países se han planteado la necesidad de fijar fechas límite para sustituir la combustión de carbón por otras fuentes de energía. Esta estrategia ha de repercutir colateralmente en la reducción de emisiones de mercurio y deberá considerarse a la hora de enfocar las medidas a corto plazo necesarias para atajarlas.

En este capítulo se revisan los datos publicados acerca de la contribución de la combustión a las emisiones de mercurio a la atmósfera, la influencia que van a tener las nuevas políticas encaminadas a la reducción de CO<sub>2</sub> en el control de estas emisiones, los procesos evaluados y desarrollados hasta el momento para reducirlas y el posible planteamiento de los objetivos a cumplir, a corto y medio plazo, ante el convenio de Minamata. En este contexto, no puede olvidarse que el control de emisiones industriales puede tardar en traducirse en una reducción de las concentraciones de mercurio en la biota.

## 1. INTRODUCCIÓN

La combustión de carbón ha venido siendo la principal fuente de emisión de mercurio a la atmósfera en Europa y la segunda a escala global (E-PRTR, 2020; UNEP, 2018). Como consecuencia, y dada la preocupación ante la repercusión para la salud humana de tales emisiones, se han desarrollado estrategias y tecnologías para su reducción, adaptadas a los distintos procesos de combustión: principalmente a los convencionales de combustión de carbón pulverizado (Pavlish *et al.*, 2010), pero también a los procesos desarrollados para alcanzar mayores eficiencias y menor emisión de otros contaminantes, como son la combustión en lecho fluidizado, la gasificación integrada de ciclo combinado, y la oxi-combustión (Pavlish *et al.*, 2010). La reducción de emisiones de mercurio en la combustión se ha planteado bajo dos estrategias: una ligada al aprovechamiento y optimización de los sistemas de limpieza de gases ya instalados en las centrales termoeléctricas para otros contaminantes, y otra enfocada al desarrollo de sistemas específicos para las especies de mercurio. Con ello, se ha conseguido un conocimiento sobre posibles tecnologías aplicables y su eficiencia, aunque su implementación se ha visto limitada por requisitos económicos y falta de legislación al respecto.

La preocupación por la incorporación de mercurio al medioambiente desde los procesos industriales es grande, y lo es todavía más la alarma ante el cambio climático debida a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Aunque esta alarma no es reciente, se ha reforzado en los últimos años, en los que sus consecuencias han quedado demostradas. Las medidas adoptadas o previstas para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> apuntan a que el carbón habrá de sustituirse por otros tipos de combustibles, como la biomasa, o por fuentes de energía renovable. En cualquier caso, aunque las políticas al respecto de la denominada descarbonatación están siendo definidas a distintas escalas, se plantean grandes incertidumbres ante su aplicación y alcance cuantitativo global. Ello es consecuencia de que las medidas a adoptar dependen de las políticas de países en distinto nivel de desarrollo económico y de los cambios que se producen ante diferentes coyunturas.

La evolución de las políticas energéticas, repercutirá colateralmente en las futuras emisiones de mercurio a la atmósfera, así como en el planteamiento de actuación en las centrales térmicas que se mantengan mientras dure la transición. En este planteamiento, deberá considerarse que, tal y como concluye el Programa de la Naciones Unidas para el medioambiente (UNEP, 2018), la reducción de las emisiones de mercurio a la atmósfera puede tardar en traducirse en una disminución de las concentraciones de mercurio en la biota, y que el mercurio depositado en la tierra, los sedimentos y los sistemas acuáticos continuará generando metilmercurio durante algún tiempo. Por ello, deberá evaluarse el enfoque que ha de darse en los próximos años al diseño de la política de control de las emisiones de mercurio procedentes de la combustión.

## 2. EMISIONES DE MERCURIO PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

Conocidas las repercusiones y problemas para el medioambiente y la salud que originan el mercurio y sus compuestos, diversos organismos inter-

nacionales, apoyados por estudios e investigaciones llevados a cabo en gran parte del mundo, han venido sensibilizándose sobre la necesidad de adoptar acciones que consigan evitar estos problemas. En cualquier caso, algunos de estos esfuerzos se han visto condicionados por circunstancias políticas y económicas. Por citar un ejemplo, podemos mencionar las revisiones que ha venido haciendo la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA, 2020) sobre las regulaciones de emisiones de mercurio en la combustión, que pueden ser y, de hecho han sido, cuestionadas (Aldy *et al.*, 2020).

A pesar de la voluntad particular de algunos países y organizaciones y, en algún caso, de la propia industria, no cabe duda de que un esfuerzo coordinado al mayor nivel posible sería el mejor camino para conseguir evitar los problemas originados por la presencia de mercurio. En este sentido, el Convenio de Minamata (The Mercury Convention, 2020), que entró en vigor en 2017, representa un poderoso impulso a los esfuerzos por reducir y eliminar el uso de mercurio y sus compuestos, y a las actividades en las que puedan utilizarse productos conteniendo estas especies. En abril de 2020, el convenio contaba con 128 países signatarios y 118 ratificaciones.

Aunque se vienen llevando a cabo inventarios de emisiones de mercurio desde 1990, el Programa ONU Medioambiente publicó el primer informe de la *Evaluación Mundial de Mercurio (Global Mercury Assessment, GMA)* en 2002, que se ha ido actualizando cada 5 años. En estos documentos, entre otros, se recogen los datos de las emisiones globales de mercurio al medioambiente y sus fuentes, obtenidos con tres años de antelación. Los informes GMA de 2013, y 2018, que presentan datos de 2010 y 2015, respectivamente, son fruto de la colaboración entre ONU Medioambiente y el Programa de Vigilancia y Evaluación del Ártico (AMAP). Entre las conclusiones más relevantes del último de ellos (UNEP, 2018), se encuentran las dos que destacamos a continuación:

1. En 2015, 17 sectores fueron responsables de generar unas 2200 toneladas de emisiones de mercurio a escala mundial, un 20% por encima de las de 2010. La Tabla 1 muestra los porcentajes desglosados para los sectores contemplados, junto con los presentados en el informe de 2013 que, como puede verse, agrupaba alguna de las actividades evaluadas en el de 2018, y no contemplaba otras. De estos datos queremos destacar la diferenciación que se hace, en el caso de la combustión, atendiendo a distintas aplicaciones y combustibles, y el hecho de que se haya producido una ligera disminución de la contribución del carbón a las emisiones totales entre los datos de 2010 y los de 2015, aunque sigan siendo del mismo orden. Más allá de la minería del oro y la combustión, los sectores industriales que más influyen en el inventario son la producción de metal no ferroso (15%), de cemento (11%) y de metal ferroso (2%). En cualquier caso, todos ellos están por debajo de la combustión de carbón y biomasa, que, en su conjunto, generaron aproximadamente el 24% de las emisiones mundiales. La mayor parte de este 24% (21,3% del total de mercurio emitido), corresponde a la combustión de carbón, principalmente en las centrales térmicas (13,1%) (The Mercury Convention, 2020).

*Tabla 1. Comparación de los porcentajes de emisiones de mercurio por sectores en los años 2010 y 2015 (UNEP, 2013-2018)*

Actividad	2015	2010
1.-Combustión de carbón (uso doméstico/residencial y transporte)	2,51	
1.-Combustión de carbón (uso industrial)	5,67	
1.-Combustión de carbón (centrales térmicas)	13,1	
<b>TOTAL COMBUSTIÓN DE CARBÓN</b>	<b>21,3</b>	24
2.-Combustión de gas (uso doméstico/residencial y transporte)	0,01	
3.-Combustión de petróleo (uso doméstico/residencial y transporte)	0,12	
2.-Combustión de gas (uso industrial)	0,01	
3.-Combustión de petróleo (uso industrial)	0,06	
2.-Combustión de gas (centrales térmicas)	0,02	
3.-Combustión de petróleo (centrales térmicas)	0,11	
<b>TOTAL COMBUSTIÓN DE GAS Y PETRÓLEO</b>	<b>0,33</b>	<b>1</b>
4.-Combustión de biomasa (uso doméstico/residencial y transporte)	2,33	
5.-Producción de arrabio y acero (primaria)	1,34	2
6.-Producción secundaria de acero	0,46	
7.-Producción de metales no ferrosos (Al , Cu, Pb, Zn)	10,3	10
8.-Producción de oro a gran escala	3,80	5
9.-Producción de mercurio	0,62	< 1
10.-Producción de cemento (materias primas y combustible, excluyendo carbón)	10,5	9
11.-Refino de petróleo	0,65	1
12.-Minería de oro artesanal y en pequeña escala (ASGM)	37,7	37
13.-Producción de cloro-álcali (proceso de mercurio)	0,68	1
14.-Emisiones de cremación	0,17	< 1
15.-Monómero de cloruro de vinilo (catalizador de mercurio)	2,60	
16.-Incineración de residuos (quema controlada)	0,67	
17.-Residuos (otros residuos)	6,60	
Residuos de productos de consumo y sitios contaminados*		9

\* Este dato no figura como tal en el informe 2015

El panorama es diferente en los datos recogidos en los informes del registro europeo de emisiones y transferencia de contaminantes (E-PRTR, 2020), que recopila, entre otras, las emisiones de mercurio de instalaciones industriales de los Estados miembros de la Unión Europea e Islandia, Liechtenstein, Noruega, Serbia y Suiza. Los últimos datos de este registro, correspondientes a 2017 (Figura 1), indican que la combustión fue la mayor fuente de emisiones de mercurio al aire, suponiendo el 60,1% del total. Este porcentaje ha crecido anualmente, como puede verse en los datos de la Figura 2, en la que también se indica el número de instalaciones que han aportado datos cada año.

2. Las contribuciones por áreas geográficas son similares en los informes de 2013 y 2018 (The Mercury Convention, 2020). Las emisiones de mercurio proceden principalmente de Asia (49%; sobre todo Asia Oriental y Sudoriental), América del Sur (18%) y África Subsahariana (16%). Aunque la minería aurífera artesanal a pequeña escala supone la principal fuente de emisiones en América del Sur y África Subsahariana, en el resto del mundo, estas se de-

ben principalmente a la producción de energía y al sector industrial. En lo que se refiere a la combustión, el continente asiático originó del orden del 66%, la Europa de los 28 el 8,7% y Norteamérica el 5%.

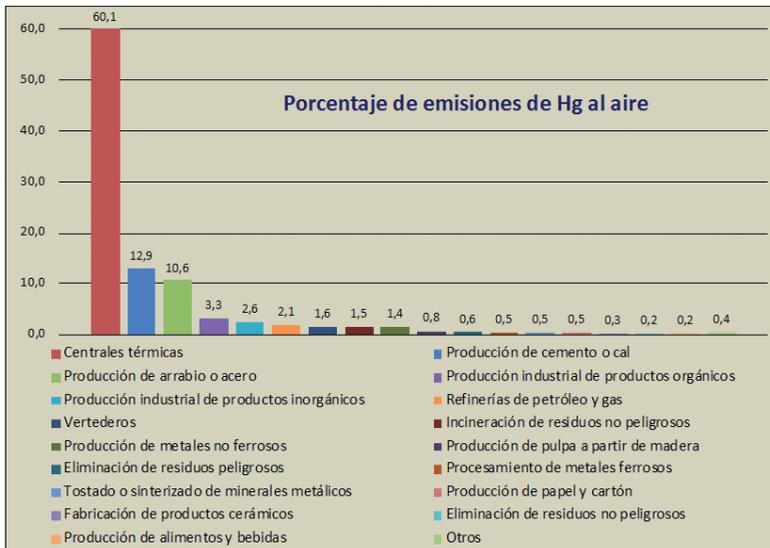


Fig. 1. Emisiones de mercurio de instalaciones industriales de los Estados miembros de la Unión Europea e Islandia, Liechtenstein, Noruega, Serbia y Suiza (datos tomados de E-PRTR, 2020)

### 3. POLÍTICAS MEDIOAMBIENTALES. SITUACIÓN AÑO 2020

El artículo 8 del Convenio de Minamata exhorta a cumplir los objetivos de reducción de las emisiones de mercurio y sus compuestos a la atmósfera, adoptando medidas para cinco categorías de fuentes contaminantes. Dos de estas categorías o actividades son las centrales térmicas y las calderas industriales de carbón. Para conseguir tales objetivos, se exigirá el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales, y, entre las medidas para lograrlo, se propone establecer una estrategia de control de múltiples contaminantes. En cualquier caso, no cabe duda de que las emisiones de mercurio procedentes de la combustión, se van a ver colateralmente influidas por las políticas medioambientales relacionadas con el control de las emisiones de CO<sub>2</sub>, que implican actuaciones frente al mantenimiento y la puesta en marcha de las centrales térmicas de carbón.

En el informe del Grupo Intergubernamental de expertos en cambio climático (IPCC) publicado en 2019 (IPCC, 2019), se contemplan cuatro posibles escenarios para el año 2030, que conllevarían una reducción de entre el 59 y el 78% de la producción de energía a partir de carbón respecto a 2010. Si, según el Acuerdo de París, se pretende que el calentamiento Global se limite a menos de 1,5 °C, el uso mundial de carbón debe caer para ese año alrededor de un 80%, mientras que para 2050 se contempla un objetivo del 98-100% de reducción de uso (IPCC, 2019). En la Cumbre de Acción Climática

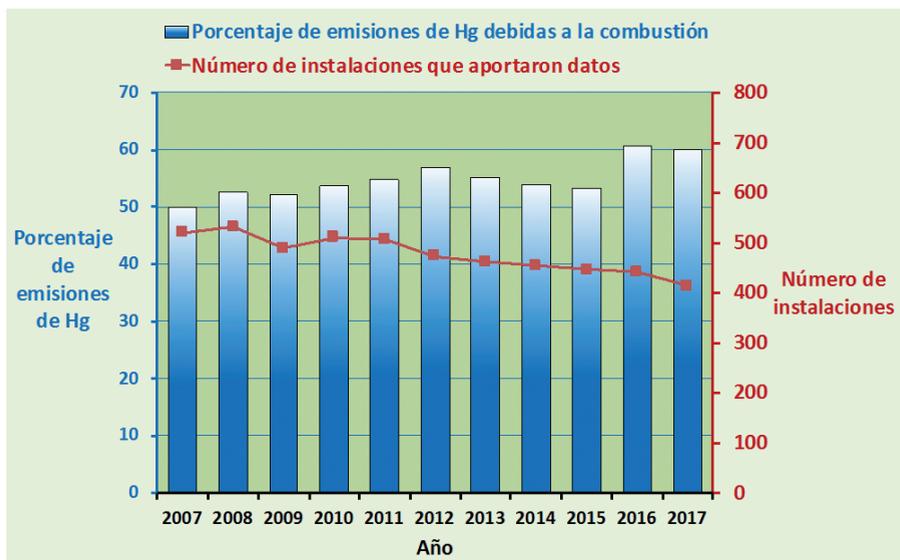


Fig. 2. Porcentaje de emisiones de mercurio originadas por la combustión de carbón en Europa y número de instalaciones que aportaron datos (datos tomados de E-PRTR, 2020)

de septiembre de 2019, cuatro años después del Acuerdo de París, se fijó el compromiso de intensificar los esfuerzos para conseguirlo (UN News, 2019). Para alcanzar tales objetivos, simultáneamente a la implementación de nuevas formas de energía, debería detenerse la construcción de nuevas plantas, ir cerrando las que están en operación, y utilizar las que se mantengan en funcionamiento de manera intermitente, tal y como ya se está haciendo en algunos casos. Sin embargo, estas estrategias no se aplican en todos los países con la misma intensidad. A pesar de que las Naciones Unidas piden urgentemente el fin de los combustibles fósiles, y muchos países anunciaron medidas para limitar la electricidad producida a partir de carbón, *todavía se están construyendo cientos de nuevas centrales eléctricas* y decenas más están en proyecto de construcción. De hecho, la Agencia Internacional de la energía (IEA), en un informe de 2019 (IEA, 2019), considera que es posible que el consumo de carbón en los próximos años no solo se mantenga, sino que experimente un cierto incremento. Todo ello indica que, a pesar de la voluntad de modificación de las políticas energéticas, se mantiene cierta incertidumbre sobre su aplicación.

Algunos datos (End Coal, 2020) estiman que, en el año 2019, las nuevas plantas de carbón supusieron a nivel global un aumento de 34,1 gigavatios (GW) respecto a 2018. Aunque, en el conjunto de los países de la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE), se cerraron, en total, centrales térmicas por valor de 34,2 GW, en otros se produjo un aumento neto de 68,3 GW, de los cuales, dos tercios se incrementaron en China y el resto se repartió fundamentalmente entre India, Malasia, Indonesia y Pa-

kistán. Esto es independiente de que en los países mencionados se haya venido reduciendo el número de plantas en construcción o en proyecto en los últimos años. Dentro del G7, a medida que Estados Unidos y la UE se alejan del carbón, Japón todavía se plantea la implementación de 11,9 GW de energía de carbón, y países como Turquía tienen previsiones de construcción de nuevas plantas. Aunque los datos que se manejan no siempre coinciden, siguen la misma tendencia y algunos análisis de la situación (Mapped, 2020) identifican que, en la actualidad, en el mundo todavía se están construyendo 200 GW y se planean otros 300 GW.

Con todo ello, se ha estimado que la generación de energía a partir de carbón cayó un 3% a nivel mundial en 2019, respecto a 2018 (End Coal, 2019). Las mayores caídas se deben a la Unión Europea (-24%) y los Estados Unidos de América (-16%), pero también, aunque a menor nivel, a países como India (-3%). Se espera que el Reino Unido ponga fin al uso de este combustible en los próximos años, que Alemania lo haga para 2038; y que otros ocho países de la Unión Europea lo consigan para 2030. Chile se ha comprometido a cerrar todas sus centrales eléctricas de carbón para 2040, y Corea del Sur cerrará 10 plantas para 2022 (UN News, 2019). Como ya hemos adelantado, un informe de la IEA (IEA, 2019), confirma que el crecimiento en la generación de energía a partir de carbón alcanzó un máximo histórico en 2018, representando el 38%, de la generación de electricidad, y que la disminución en 2019, puede estar dentro de las fluctuaciones que se producen en el transcurso de una década. En los próximos cinco años, la IEA prevé que la demanda mundial de carbón se mantenga estable, como consecuencia del resistente mercado chino, que representa la mitad del consumo mundial, y considera que las tendencias se mantendrán estables hasta 2024.

#### **4. MEDIDAS PROPUESTAS Y DESARROLLADAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE MERCURIO PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN**

El escenario para el control de las emisiones de mercurio en los próximos años, deberá contemplar las restricciones en la combustión del carbón y, simultáneamente, evaluar la pertinencia de implementar los procesos y tecnologías desarrollados para detener tales emisiones, mientras la combustión de carbón se mantenga. Para ello, debe hacerse una valoración de las tecnologías disponibles o en desarrollo para evitar, o al menos reducir, las emisiones de mercurio a la atmósfera procedentes de esta actividad industrial. Antes de revisar estas tecnologías, debemos recordar que la especie de mercurio mayoritaria en los gases de combustión es el Hg<sup>0</sup>, que es la menos reactiva y la más difícil de capturar, por lo que el mayor esfuerzo debe concentrarse en la eficiencia que puedan alcanzar las tecnologías propuestas para esta especie.

##### **4.1. Retención de mercurio en los sistemas de eliminación de otros contaminantes instalados en las centrales térmicas de carbón**

Las centrales térmicas de carbón modernas están equipadas con sistemas para el control de los contaminantes mayoritarios presentes en la corriente

gaseosa. Todas disponen de precipitadores electrostáticos o filtros de mangas para la retención de las partículas de cenizas, pero algunas también han instalado sistemas para evitar las emisiones de NO<sub>x</sub>, lo que se consigue fundamentalmente mediante sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR), y para capturar el SO<sub>2</sub>, lo que se logra mayoritariamente en lavadores de gases (WFGD), en los que, mediante la inyección de una lechada de caliza, se precipita el SO<sub>2</sub> como yeso. Sin embargo, hasta el momento, las plantas de combustión de carbón no disponen de tecnologías específicas para reducir las emisiones de mercurio, aunque se han hecho algunas tentativas (Pavlish *et al.*, 2010). En cualquier caso, se ha demostrado que los mencionados sistemas para el control de partículas, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, con algunas modificaciones y controles, pueden favorecer la captura de mercurio en los subproductos, y, por lo tanto, ser aprovechados para disminuir sus emisiones a la atmósfera. Esta estrategia permite reducir una parte de las emisiones por la chimenea, aunque no evita la producción de residuos conteniendo este metal tóxico.

Los sistemas SCR para el control de emisiones de NO<sub>x</sub> pueden favorecer la oxidación del Hg<sup>0</sup>, que es la especie de mercurio que sale de la caldera y la mayoritaria en los gases de combustión. La oxidación del Hg<sup>0</sup> en los sistemas SCR se produce si se emplea el catalizador adecuado, para lo cual se han desarrollado catalizadores que, simultáneamente a la reducción de los NO<sub>x</sub>, consiguen la oxidación del Hg<sup>0</sup> (Cimino y Scala, 2016; Zhao *et al.*, 2015). Con ello no se logra, ni se pretende, que el mercurio quede retenido en los sistemas SCR, sino transformarlo en una especie reactiva de mercurio que, posteriormente, quede retenida en las partículas o disuelta en los sistemas WFGD. En cualquier caso, los catalizadores capaces de oxidar eficientemente el Hg<sup>0</sup> necesitan un desarrollo particular para cada planta y tipo de combustible.

Los sistemas de control de partículas más utilizados son los precipitadores electrostáticos y los filtros de mangas, que retienen las cenizas volantes arrastradas en la corriente gaseosa, incluidas las que han adsorbido mercurio durante el transporte. La eficiencia de adsorción de mercurio en las cenizas volantes depende de las características de estas partículas y, asimismo, de la composición del gas (Abad-Valle *et al.*, 2011). Por otra parte, los filtros de mangas son más eficientes que los precipitadores electrostáticos para retener mercurio (Wang *et al.*, 2008), debido a que en ellos puede producirse una retención adicional del mercurio que se mantiene en el gas, al entrar en contacto con las cenizas volantes que se van acumulando sobre el filtro y que actúan como un sorbente.

Los sistemas de desulfuración más utilizados en las centrales térmicas son los lavadores en húmedo (WFGD). En ellos, además de los compuestos de azufre, pueden quedar retenidas otras especies capaces de reaccionar con la caliza o de disolverse en el agua. El Hg<sup>0</sup> insoluble no queda retenido, pero las especies de mercurio en estado oxidado pueden disolverse en la lechada de yeso, de ahí la importante contribución de los mencionados catalizadores SCR en el balance total de mercurio no emitido. En cualquier caso, el proceso de retención en la lechada puede no ser eficiente al 100%, debido a una serie de reacciones que pueden producirse con otras especies que también llegan a la planta de desulfuración, arrastradas por los gases o en el agua, y que modifican la composición de la lechada. Hay que considerar que el agua

utilizada en el proceso se recircula, con lo que se va enriqueciendo en especies disueltas. Todo ello origina complejas reacciones en las que las especies de mercurio pueden llegar a reducirse a  $\text{Hg}^0$  gaseoso, proceso claramente indeseado, que se denomina re-emisión (Ochoa-González *et al.*, 2011; 2013). En el mejor de los casos, el mercurio retenido en los sistemas WFGD permanece en el agua recirculada o rechazada y en el yeso, con las implicaciones que ello conlleva, entre las que no debe ignorarse la pérdida de valor del yeso como producto comercializable.

#### **4.2. Sistemas específicos para la captura de mercurio en las centrales térmicas de carbón**

Las tecnologías especialmente diseñadas para retener mercurio en fase gas en las centrales térmicas se basan en el empleo de sorbentes, que se desarrollan para ser utilizados por dos vías. Una es la inyección en la corriente gaseosa y la segunda su utilización en un lecho fijo o fluidizado.

La inyección de sorbentes sólidos no regenerables en el gas de combustión, antes de los sistemas de captura de las partículas de ceniza, es la tecnología más estudiada, evaluada e incluso probada (Pavlish *et al.*, 2010). El mercurio se adsorbe en las partículas del sorbente inyectado, capturándose este sólido a continuación junto con las cenizas volantes. Para ello, se han evaluado, entre otros, materiales como zeolitas, coques de petróleo, biocharres y minerales (Li *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2010; 2020; Xiao *et al.*, 2017), pero los carbones activos, fundamentalmente los impregnados con azufre o compuestos halogenados, son los sorbentes más maduros, eficientes y disponibles comercialmente (Sjostrom *et al.*, 2010). Las limitaciones del proceso de inyección de sorbentes no regenerables están relacionadas con los costes asociados a su preparación, especialmente en el caso de carbones impregnados, y a la imposibilidad de reutilizarlos, lo que además conlleva la generación de residuos. A ello se añade que el sorbente se desecha junto con las cenizas, comprometiendo la calidad de las mismas para su posible aprovechamiento, por ejemplo, como materiales de construcción.

La alternativa está en el uso de sorbentes regenerables que podrían ser empleados en lechos, aunque también se ha propuesto su empleo en procesos de inyección, seguidos de su captura en filtros de mangas, posterior regeneración, y reciclado para su nueva inyección (Cao *et al.*, 2017). Estos sorbentes, que pueden ser utilizados un número de ciclos, permiten recuperar y aislar el mercurio retenido mediante la regeneración y el sorbente agotado libre de mercurio constituye un residuo no peligroso. El desarrollo de sorbentes regenerables para la captura de mercurio es altamente versátil y podría aplicarse a diversos procesos industriales y de descontaminación. Aunque esta tecnología ya se aplica en algunos procesos industriales de purificación de gas natural (Sun *et al.*, 2018), la búsqueda y optimización de materiales para su desarrollo y evaluación como sorbentes eficientes y con larga vida útil no ha cesado. Los desarrollados hasta el momento se basan, en su mayoría, en metales u óxidos metálicos soportados en materiales porosos de elevada área superficial. Los metales más empleados son metales nobles capaces de amalgamar con el mercurio elemental, pero también de catalizar la oxidación del  $\text{Hg}^0$ . Aunque el desarrollo de estos materiales incluye

la posibilidad de nanodispersarlos y optimizar su eficiencia con bajas concentraciones de metal, y a pesar de que con ellos se han obtenido resultados muy prometedores (Gómez-Giménez *et al.*, 2017; Lopez-Anton *et al.*, 2016; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2013), se mantienen ciertas reservas sobre su empleo cuando se cuestionan los costes de inversión que supone su obtención para ser utilizados a escala industrial.

La alternativa a los metales nobles son los óxidos metálicos, alguno de los cuales han mostrado buenas capacidades de regeneración. Se han estudiado diversos materiales de este tipo como sorbentes de mercurio, como los óxidos de cerio ( $\text{CeO}_2$ ) soportados en coques activados (Hua *et al.*, 2010), o los de manganeso ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$  y  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) soportados en zirconita, alúmina u óxidos de titanio (Scala y Cimino, 2015), pero también se han desarrollado y evaluado óxidos mixtos, como los de Ce-Mn (Qu *et al.*, 2015). Además, se ha identificado el potencial de los óxidos de hierro depositados en soportes como carbones activos (Trobajo *et al.*, 2018) y espumas de carbono (Antuña-Nieto *et al.*, 2020) en la adsorción de  $\text{Hg}^0$ . En cualquier caso, tanto la inyección de sorbentes en la corriente gaseosa, como la adsorción de mercurio en lechos de sorbentes requieren la incorporación de nuevos dispositivos en las centrales térmicas.

## 5. CONCLUSIONES Y REFLEXIÓN FINAL

Con los datos de que se dispone en el año 2020, se concluye que la cantidad de mercurio emitido a la atmósfera, desde los procesos de combustión de carbón, no ha disminuido, sino que sigue creciendo anualmente. Aunque puede decirse que, gracias a los sistemas de control de otros contaminantes, es posible que el mercurio emitido en una planta en concreto pueda reducirse, esto no se ha visto reflejado en el cómputo total, probablemente debido al incremento en el uso del carbón que se ha producido durante los últimos años. No cabe duda de que, a medida que la combustión de carbón se vaya sustituyendo por otras fuentes de energía, hasta alcanzar los objetivos marcados para 2050, la concentración de mercurio en la atmósfera se irá reduciendo de manera colateral, pero, mientras tanto, si no se implementa un sistema de captura de mercurio en las plantas en operación y en las de nueva construcción, el mercurio seguirá acumulándose en la biota, seguirá produciendo problemas para la salud y se seguirán requiriendo esfuerzos para la futura descontaminación del planeta. Esta situación hace aconsejable revisar la estrategia encaminada hacia la reducción de mercurio y replantearse la aplicación de las medidas más realistas para conseguirlo. Aunque el primer paso para controlar las emisiones de mercurio en una central térmica de carbón es optimizar los sistemas de limpieza de gases ya instalados, hasta conseguir la máxima retención de mercurio sin comprometer la calidad de los subproductos: dado que estos sistemas no consiguen la reducción total, los métodos específicos para la retención de mercurio tendrán que ser considerados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad-Valle, P., López-Antón, M. A., Díaz-Somoano, M., Martínez-Tarazona, M. R., 2011. The role of unburned carbon concentrates from fly ashes in the oxidation and retention of mercury. *Chemical Engineering Journal*, 174: 86-92.
- Aldy, J., Kotchen, M., Evans, M., Fowlie, M., Levinson, A., Palmer, K., 2020. Deep flaws in a mercury regulatory analysis. *Science*, 368(6488): 247-248.
- Antuña-Nieto, C., Rodríguez E., López-Antón, M. A., García, R., Martínez-Tarazona, M. R., 2020. Carbon materials loaded with maghemite as regenerable sorbents for gaseous Hg<sup>0</sup> removal. *Chemical Engineering Journal*, 387: 124151.
- Cao, T., Li, Z., Xiong, Y., Yang, Y., Xu, S., Bisson, T., Gupta, R., Xu, Z., 2017. Silica-Silver Nanocomposites as Regenerable Sorbents for Hg<sup>0</sup> Removal from Flue Gases. *Environmental Science and Technology*, 51: 11909-11917.
- Cimino, S., Scala, F., 2016. Removal of Elemental Mercury by MnOx Catalysts Supported on TiO<sub>2</sub> or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(18): 5133-5138.
- E-PRTR, 2020. [Online]. Disponible: <https://prtr.eea.europa.eu/#/pollutantreleases>
- End Coal - Boom and Bust 2020. [Online]. Disponible: [https://endcoal.org/wp-content/uploads/2020/03/BoomAndBust\\_2020\\_English.pdf](https://endcoal.org/wp-content/uploads/2020/03/BoomAndBust_2020_English.pdf)
- Gómez-Giménez, C., Izquierdo, M. T., Obras-Loscertales, M. de las, Diego, L. F. de, García-Labiano, F., Adánez, J., 2017. Mercury capture by a structured Au/C regenerable sorbent under oxycoal combustion representative and real conditions. *Fuel*, 207: 821-829.
- Hua, X.-Y., Zhou, J. S., Li, Q., Luo, Z.-Y., Cen, K. F., 2010. Gas-Phase Elemental Mercury Removal by CeO<sub>2</sub> Impregnated Activated Coke. *Energy Fuels*, 24(10): 5426-5431.
- IEA, Coal 2019 Analysis. [Online]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/coal-2019>
- IPCC Special Report 1.5-SPM. 2019. [Online]. Disponible: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf)
- Li, G., Shen, B., Li, F., Tian, L., Singh, S., Wang, F., 2015. Elemental mercury removal using biochar pyrolyzed from municipal solid waste. *Fuel Processing Technology*, 113: 43-50.
- Liu, H., Chang, L., Liu, W., Xiong, Z., Zhao, Y., Zhang, J., 2020. Advances in mercury removal from coal-fired flue gas by mineral adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 379: 122263.
- Liu, Y., Bisson, T. M., Yang, H., Xu, Z., 2010. Recent developments in novel sorbents for flue gas clean up. *Fuel Processing Technology*, 91: 1175-1197.
- López-Antón, M. A., Fernández-Miranda, N., Martínez-Tarazona, M.R., 2016. The application of regenerable sorbents for mercury capture in gas phase. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 24495-24503.
- Mapped: The world's coal power plants in 2020. [Online]. Disponible: <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants>
- Ochoa-González, R., Córdoba, P., Díaz-Somoano, M., Font, O., López-Antón, M. A., Leiva, C., Martínez-Tarazona, M.R., Querol, X., Fernández, C., Tomás, A., Gómez, P., Mesado, P., 2011. Differential partitioning and speciation of Hg in wet FGD facilities of two Spanish PCC power plants. *Chemosphere*, 85: 565-570.
- Ochoa-González, R., Díaz-Somoano, M., Martínez-Tarazona, M.R., 2013. Influence of Limestone Characteristics on Mercury Re-emission in WFGD Systems. *Environmental Science and Technology*, 47(6): 2974-2981.
- Pavlish, J. H., Hamre, L. L., Zhuang, Y., 2010. Mercury control technologies for coal combustion and gasification systems. *Fuel*, 89: 838-847.
- Qu, Z., Xie, J., Xu, H., Chen, W., Yan, N., 2015. Regenerable Sorbent with a High Capacity for Elemental Mercury Removal and Recycling from the Simulated Flue Gas at a Low Temperature. *Energy Fuels*, 29(10): 6187-6196.

- Rodríguez-Pérez, J., López-Antón, M. A., Díaz-Somoano, M., García, R., Martínez-Tarazona, M.R., 2013. Regenerable sorbents for mercury capture in simulated coal combustion flue gas. *Journal of Hazardous Materials*, 260: 869–877.
- Scala, F., Cimino, S., 2015. Elemental mercury capture and oxidation by a regenerable manganese-based sorbent: The effect of gas composition. *Chemistry Engineering Journal*, 278: 134–139.
- Sjostrom, S., Durham, M., Bustard, C.J., Martin, C. 2010. Activated carbon injection for mercury control: Overview. *Fuel*, 89: 1320–1322.
- Sun, H., Zhao, S., Ma, Y., Wu, J., Liang, P., Yang, D., Zhang, H., 2018. Effective and regenerable Ag/4A zeolite nanocomposite for Hg<sup>0</sup> removal from natural gas. *Journal of Alloys and Compounds*, 762: 520–527.
- The Mercury Convention website. 2020. [Online]. Disponible: <http://www.mercuryconvention.org/Recursos/informaci%C3%B3n/Publicaciones/tabid/5784/language/es-CO/Default.aspx>
- Trobajo, J. R., Antuña-Nieto, C., Rodríguez, E., García, R., López-Antón, M. A., Martínez-Tarazona, M.R., 2018. Carbon-based sorbents impregnated with iron oxides for removing mercury in energy generation processes. *Energy*, 159: 648–655.
- UN News 2019. ¿Está el mundo listo para terminar la era del carbón y adoptar la energía limpia? [Online]. Disponible: <https://news.un.org/es/story/2019/12/1466311>
- UNEP (UN Environment Programme), 2018. Global mercury assessment. [Online]. Disponible: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury/global-mercury-assessment>
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 2020. Mercury and Air Toxics Standards, [Online]. Disponible: <https://www.epa.gov/mats/final-revised-supplemental-finding-and-results-residual-risk-and-technology-review>
- Wang, Y. J., Duan Y. F., Yang L. G., Jiang Y. M., Wu C. J., Wang Q., Yang X. H., 2008. Comparison of mercury removal characteristics between filter and electrostatic precipitators of coal-fired power plants. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 36: 23–29.
- Xiao, Y., Pudasainee, D., Gupta, R., Xu, Z., Diao, Y., 2017. Bromination of petroleum coke for elemental mercury capture. *Journal of Hazardous Materials*, 336: 232–239.
- Zhao, L., Li, C., Zhang, X., Zeng, G., Zhang, J., Xie, Y., 2015. A review on oxidation of elemental mercury from coal-fired flue gas with selective catalytic reduction catalysts. *Catalysis Science and Technology*, 5: 3459–3472.