

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MERCURIO EN LAS PLANTAS CARBOELÉCTRICAS DE MÉXICO

Rodolfo SOSA ECHEVERRÍA^{1*}, Humberto BRAVO ALVAREZ¹, Gilberto FUENTES GARCÍA¹, Sergio ROSAS DE ALVA², Elías GRANADOS HERNÁNDEZ¹ y Pablo SÁNCHEZ ALVAREZ¹.

¹ Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, Delegación Coyoacán, Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México, C. P. 04510.

² Subdirección de Generación, Comisión Federal de Electricidad. Don Manuelito 11, Olivar de los Padres, Delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México, México, C. P. 01780

*Autor para correspondencia: rodsosa@unam.mx

(Recibido febrero 2016; aceptado agosto 2016)

Palabras clave: carbón, contaminación atmosférica, contaminantes atmosféricos tóxicos, factores de emisión, generación de electricidad

RESUMEN

Reducir las emisiones de mercurio en la atmósfera es uno de los acuerdos tomados en la Convención Internacional de Minamata, llevada a cabo en Kumamoto Japón en 2013. Ante este compromiso se estableció como objetivo principal de este estudio la estimación de la variación temporal mensual de las emisiones de mercurio por unidad de generación para cada una de las tres carboeléctricas en México, durante los años 2012 y 2013. Las emisiones se estimaron con base en el procedimiento de la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (USEPA), a partir del contenido de mercurio en el carbón y aplicando factores de emisión, conociendo el consumo real del combustible. Los resultados muestran que la mayor emisión se presentó en la carboeléctrica localizada en Petacalco, Guerrero, siendo la unidad de generación número siete la que tuvo una mayor emisión. Además, en todos los casos fue durante el verano cuando una mayor cantidad de mercurio fue emitido debido a un mayor requerimiento de energía eléctrica. Este estudio es importante como herramienta preliminar en la toma de decisiones en el proceso de prevención, minimización y control de contaminantes tóxicos, que se alinea con los acuerdos internacionales para la protección del ambiente y de la sociedad.

Key words: coal, atmospheric pollution, toxic air pollutants, emission factors, electricity generation

ABSTRACT

To reduce mercury emissions in the atmosphere is one of the agreements reached at the International Convention of Minamata, held in Kumamoto, Japan in 2013. In view of this commitment the main objective of this study was estimating monthly temporal variation of mercury emissions per generation unit for each of the three coal-fired power plants in Mexico during the years 2012 and 2013. Emissions were estimated based on the method of the US Environmental Protection Agency (USEPA), from mercury content in coal and emission factors, knowing the actual fuel consumption. The results show that the greatest emission was presented in the coal-fired power plant located in Petacalco, Guerrero, with the generating unit number seven presenting the major emissions. Furthermore, in all

cases it was during the summer when a major amount of mercury was emitted due to a large requirement of electricity. This study is important as a preliminary tool for decision making in the process of prevention, minimization and control of toxic pollutants, which contribute to international agreements for the protection of the environment and society.

INTRODUCCIÓN

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 2013), en el artículo número ocho del Convenio Internacional de Minamata, indica que hay que controlar y cuando sea posible reducir las emisiones de mercurio (Hg) y sus compuestos a la atmósfera, a través de medidas para examinar las emisiones de las fuentes puntuales. Esto debido a que el Hg es reconocido como una sustancia que produce efectos sobre la salud afectando el sistema nervioso central y otros daños significativos, con preocupación particular por sus efectos en los niños aún no nacidos y los lactantes (OMS 2013).

Además, el transporte atmosférico de Hg en el ambiente y su capacidad de bioacumularse en los ecosistemas fue una razón clave para tomar la decisión global que haga frente al problema de la contaminación por mercurio (IPEN 2015).

Los riesgos de la contaminación por Hg han atraído sin duda un creciente interés de los organismos internacionales a nivel mundial en los últimos años, principalmente por las centrales carboeléctricas (Zhou et al. 2013), que emiten una gran cantidad de compuestos tóxicos como el Hg, Arsénico (As) y Selenio (Se) (Tian et al. 2007), siendo el Hg uno de los contaminantes más importantes emitidos a la atmósfera, agua y tierra (Glogeky y Pacyna 2009).

Las carboeléctricas sin sistemas de control no sólo emiten Hg elemental gaseoso, sino también grandes cantidades de Hg adherido a partículas y Hg oxidado, observándose en un estudio en los Estados Unidos de América (EUA), que más del 70 % del Hg asociado al depósito atmosférico húmedo proviene de centrales carboeléctricas, aumentando la cantidad de metilmercurio [CH_3Hg]⁺ en lagos y ríos cercanos (IPEN 2015). Con base en la información del documento denominado Revisión Estadística de Energía Mundial, (SRWE, por sus siglas en inglés 2014), el consumo de carbón a nivel mundial en los últimos diez años (2003-2013) presentó una tasa media de crecimiento anual (tmca) del 3.8 % y para el caso de México fue del 4.3 %.

En un estudio realizado por Mugica et al. (2003) sobre el contenido de Hg en cenizas de una carboeléctrica y una petroquímica, se indica que las concentraciones entre los lotes de cenizas muestran

grandes variaciones en el contenido del contaminante. Lo anterior puede deberse a la frecuencia de limpieza de las cámaras de combustión, ya que en ocasiones las cenizas permanecen más tiempo propiciando la mayor acumulación de Hg.

Por otro lado, la capacidad efectiva total de generación de energía eléctrica en México para el año 2003 fue de 44 561 mega watts (MW) y para el año 2013 se ubicó en 53 497 MW, es decir, presentó una tmca en el periodo 2003-2013 del 1.8 %. Para el caso de las carboeléctricas no varió su capacidad ubicándose en 2600 MW (SENER 2015a). El consumo de energía del sector eléctrico se basó principalmente en combustibles fósiles, de 22 termoeléctricas y tres carboeléctricas (SENER 2015b), consumiendo en el año 2003, 47 % de combustóleo, 23 % de carbón, 28 % de gas natural (GN) y 2 % de diésel, para el año 2013 fueron de: 31, 26, 41 y 2 % respectivamente (SENER 2015c). Las carboeléctricas en operación son: 1) Plutarco Elías Calles (CETEPEC), localizada en Petacalco, Guerrero, 2) Carbón II (CII) y 3) José López Portillo (JLP), localizadas en Piedras Negras, Coahuila (INE 2015).

De acuerdo con lo publicado por la Agencia Internacional de Energía (AIE 2014), el carbón utilizado en las centrales carboeléctricas en México es de tipo sub bituminoso, definido como un carbón de bajo rango (SENER 2014), el cual tiene las siguientes características: contenido promedio (CP) de cloro (158 ppm), porcentaje promedio (PP) de azufre (0.50 %), PP de cenizas (8.0 %) y poder calorífico promedio (PCp) (12 000 BTU/lb) (EPA 2008).

Así también, un boletín de prensa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE 2012) indica que el carbón utilizado en las carboeléctricas en el estado de Coahuila (JLP y CII) es de producción nacional, mientras que la del estado de Guerrero (CETEPEC) es de importación proveniente de Australia, EUA, Canadá, Colombia y Sudáfrica, con un porcentaje de participación del 48.5, 41.5, 3.7, 1.4 y 3.8 % respectivamente (SENER 2012). Para el año 2013 este porcentaje en la importación de carbón no varió (SENER 2013).

Las emisiones mundiales de Hg de fuentes antrópicas en el año 2000, fueron de 2 177 800 kg, emitiendo México un total de 25 800 kg (ECCAD 2015). Para el año 2005, en México las principales emisoras de Hg

fueron las centrales carboeléctricas participando con el 85 % de este contaminante (Hg), ubicándose la tasa de emisión de Hg de las tres carboeléctricas entre 0.050 y 0.072 kg por giga watt hora (kg/GWh) (CEC 2011).

Por otro lado, de acuerdo con lo publicado por Streets (2009), en la formulación de uno de sus escenarios de emisión de Hg, para el año 2050 se esperaría emitir, a escala mundial, 4855 600 kg con una participación del 49 % de las plantas generadoras de electricidad.

Ante este panorama, el objetivo principal de este trabajo fue realizar un análisis en la estimación de emisiones atmosféricas de Hg, utilizando su contenido en el carbón y aplicando factores de emisión, provenientes de las centrales carboeléctricas en operación en México. Se espera que lo anterior permita plantear estrategias de prevención, minimización y control de este contaminante en esta industria y reducir su impacto ambiental en México y a nivel mundial. Para lograr este propósito se contó con la información real sobre el consumo de carbón mensual y por unidad de generación para cada una de las centrales carboeléctricas estudiadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se consideró, en primer lugar, que el carbón consumido en las carboeléctricas JLP y CII es de tipo nacional. Para este estudio se consideró, en primer lugar, que el carbón consumido en las carboeléctricas JLP y CII es de tipo nacional. En cuanto a la carboeléctrica CETEPEC, se sabe que importa carbón de alto poder calorífico, baja humedad, baja ceniza y bajo azufre procedente de Australia, EUA, Canadá, Colombia y Sudáfrica (CFE 2012). Sin embargo, para este estudio se consideró que la carboeléctrica CETEPEC opera solamente con carbón proveniente de Australia y EUA debido a que la Secretaría de Energía en sus informes 2012 y 2013 menciona que la mayor parte de carbón importado proviene de Australia y EUA con una participación del 48.5 y 41.5 % respectivamente (SENER 2012 y 2013).

De esta forma para estimar la emisión de Hg a la atmósfera de las plantas de generación de energía eléctrica que consumen carbón en México (carboeléctricas), se usaron dos ecuaciones considerando la aplicación de factores de emisión (FE) (EPA 2015) y el contenido de Hg (EPA 1997):

La ecuación general aplicando el FE es:

$$E = A \times FE \times (1-ER/100) \quad (1)$$

Donde:

E = emisión

A = tasa de actividad

FE = factor de emisión y

ER = eficiencia global de reducción de emisiones (%)

Al utilizar la ecuación anterior se considera que no existe equipo de control para la reducción de emisiones, siendo la expresión $(1-ER/100)$ igual a uno.

La ecuación general aplicando el contenido de Hg es:

$$E = (CMc) \times (A) \times (FLc) \times (FEM) \quad (2)$$

Donde:

E = emisión

CMc = contenido de mercurio en el carbón

A = tasa de actividad

FLc = factor de limpieza del carbón, y

FEM = factor de emisión modificado

Para el cálculo utilizando la ecuación 2 y con base en las características de las centrales estudiadas se estableció que no existe FLc y no hay un FEM, por lo cual las dos variables no se consideran para el cálculo.

En las ecuaciones 1 y 2 la variable A representa la cantidad de carbón consumido por unidad de generación en toneladas por mes (t/mes), para cada una de las tres carboeléctricas (JLP, CII y CETEPEC) (Bravo et al. 2012). La variable FE en la primera ecuación se representa en kilogramos de Hg por tonelada (kg/t) de carbón consumido al igual que el CMc en la segunda ecuación. Los FE se encuentran en un intervalo de 4×10^{-5} a 3×10^{-4} kg/t (Pirrone et al. 2010) y el CMc nacional se estableció en 1.05×10^{-4} kg/t (CCA 2001). Para el carbón proveniente de Australia el FE se encontró en un intervalo de 3.0×10^{-5} a 1.5×10^{-3} kg/t (Pirrone et al. 2010) y finalmente para el carbón proveniente de EUA en un intervalo entre 2.0×10^{-5} y 1.5×10^{-3} (Pacyna et al. 2006).

La estimación de las emisiones de Hg, para cada una de las centrales carboeléctricas estudiadas, se llevó a cabo considerando su variación temporal mensual y por unidad de generación proporcionadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estimar la emisión total anual de Hg aplicando los FE y CMc se utilizaron las ecuaciones 3 y 4.

$$Et = \sum_{i=1}^n (Ai * FE) \quad (3)$$

$$Et = \sum_{i=1}^n (Ai * CMc) \quad (4)$$

Donde:

E_t = Emisión total (kg/año)

i = mes a evaluar (enero a diciembre)

A_i = Tasa de actividad (Carbón consumido – t/mes)

FE = Factor de emisión (kg/t)

CMc = Contenido de mercurio en carbón (kg/t)

Al analizar la **figura 1** se puede decir, en primer lugar, que la estimación de las emisiones totales anuales para el año 2012 son mayores a las que se presentan en el año 2013, independientemente si se utiliza el contenido de Hg en el carbón o aplicando factores de emisión para el cálculo en su estimación.

Al utilizar el contenido de Hg para el caso de México (1.05×10^{-4} kg/t), se puede observar en la **figura 1** que la diferencia en el periodo 2012-2013

es de 112 kg, es decir presentó un 6.8 % menos de emisiones en el 2013, con una tmca de -3.6% . Para el caso de utilizar carbón de EUA su intervalo en el contenido de Hg ($2.0 \times 10^{-5} - 1.5 \times 10^{-3}$ kg/t), se muestra que la diferencia en las emisiones en el intervalo inferior para los años 2012 y 2013 es de 19 kg y para el intervalo superior de 1464 kg con una tmca de -3.2 y -3.3% respectivamente. Para el caso de utilizar carbón de Australia (contenido de $3.0 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-3}$ kg/t), los valores fueron de 30 y 1464 kg y una tmca de -3.4 y -3.3% respectivamente. Finalmente, si utilizamos el intervalo de los FE, los valores serían de 39 y 293 kg y su tmca de -3.32 y 3.32% respectivamente.

El **cuadro I** muestra la emisión de Hg y su tasa de emisión considerando la aplicación de un promedio

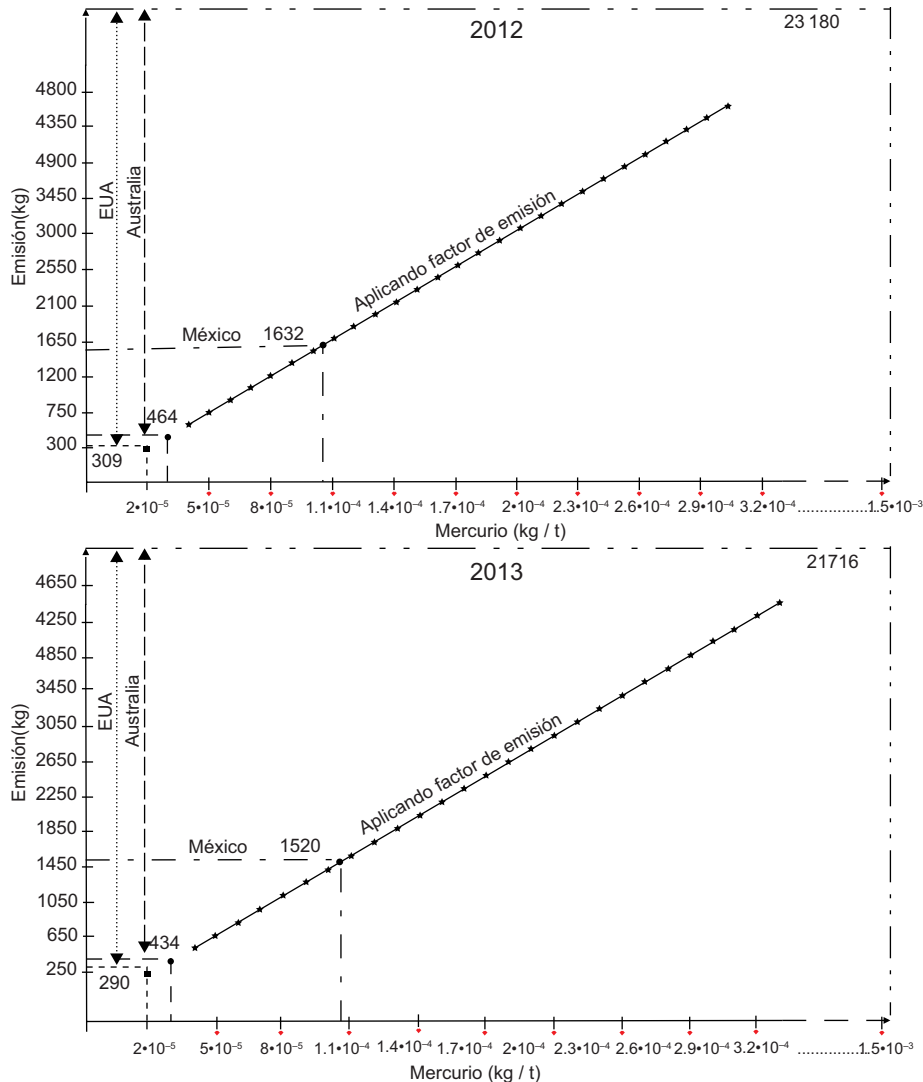


Fig. 1. Estimación total anual de las emisiones de Hg para los años 2012 y 2013

CUADRO I. ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y TASA DE EMISIÓN DE Hg PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013

2012									
Unidades	Generación de electricidad (GWh)	Emisión (kg)		Tasa de emisión (kg / Gwh)		Emisión (kg)		Tasa de emisión (kg / Gwh)	
		Utilizando su contenido de Hg				Aplicando factor de emisión			
U1	2 337	137		0.059		222		0.095	
U2	2 167	124		0.057		200		0.092	
U3	2 429	144		0.059		233		0.096	
U4	2 085	121		0.058		197		0.094	
Total	9 018	526				852			
CII									
U1	2 394	127		0.053		206		0.086	
U2	2 432	137		0.056		222		0.091	
U3	2 147	117		0.054		189		0.088	
U4	1 732	97		0.056		158		0.091	
Total	8 706	478				774			
CETEPEC									
		EUA		Australia		EUA		Australia	
U1	1 016	287	289	0.283	0.285	64		0.063	
U2	903	262	264	0.291	0.293	59		0.065	
U3	2 245	639	643	0.284	0.286	143		0.064	
U4	2 364	662	667	0.28	0.282	148		0.063	
U5	2 139	606	610	0.283	0.285	136		0.063	
U6	2 546	722	726	0.283	0.285	161		0.063	
U7	5 020	1 294	1 303	0.258	0.26	289		0.058	
Total	16 234	4 473	4 502			1 000			
TOTAL	33 958	5 477	5 507			2 626			
2013									
Unidades	Generación de electricidad (GWh)	Emisión (kg)		Tasa de emisión (kg / Gwh)		Emisión (kg)		Tasa de emisión (kg / Gwh)	
		Utilizando su contenido de Hg				Aplicando factor de emisión			
JLP									
U1	1 840	108		0.059		175		0.095	
U2	2 094	120		0.058		195		0.093	
U3	2 040	117		0.057		189		0.093	
U4	2 132	124		0.058		200		0.094	
Total	8 106	469				760			
CII									
U1	2 381	131		0.055		212		0.089	
U2	1 816	103		0.056		166		0.091	
U3	1 580	85		0.054		137		0.087	
U4	2 161	120		0.056		194		0.09	
Total	7 939	438				710			

CUADRO I. ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y TASA DE EMISIÓN DE Hg PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013

Unidades	Generación de electricidad (GWh)	Emisión (kg)		Tasa de emisión (kg / Gwh)		Emisión (kg)	Tasa de emisión (kg / Gwh)
		Utilizando su contenido de Hg		Aplicando factor de emisión			
CETEPEC							
		EUA	Australia	EUA	Australia		
U1	2 272	671	675	0.295	0.297	150	0.066
U2	1 041	307	309	0.295	0.297	69	0.066
U3	1 512	447	450	0.296	0.298	100	0.066
U4	2 124	624	628	0.294	0.296	140	0.066
U5	2 051	594	597	0.289	0.291	133	0.065
U6	1 771	519	522	0.293	0.295	116	0.066
U7	4 813	1 271	1 280	0.264	0.266	284	0.059
Total	15 584	4 433	4 462			992	
TOTAL	31 628	5 341	5 370			2 462	

del intervalo de los FE para JLP, CII y CETEPEC, así como, en el caso del contenido de Hg para el carbón de EUA y de Australia utilizado en CETEPEC. El análisis de los resultados de este **cuadro I** es el siguiente: para el año 2012 la tasa de emisión utilizando el contenido de Hg para cada una de las unidades de proceso de la planta JLP fluctuó entre 0.057 y 0.059 kg/GWh, estimando un total de las emisiones de Hg para las cuatro unidades de proceso de 526 kg. En la planta CII, los valores fueron de 0.053 y 0.056 kg/GWh y una emisión total de 478 kg. Para la planta de CETEPEC, con consumo de carbón de EUA, los valores fueron de 0.280 y 0.291 kg/GWh, con una emisión total de sus siete unidades de proceso de 4473 kg, en el caso de consumir carbón de Australia los valores fueron: 0.260 y 0.293 kg/GWh y una emisión total de 4502 kg.

Cuando se aplican los FE los valores fueron los siguientes: 0.092 y 0.096 kg/GWh y una emisión total de 852 kg para la planta JLP, 0.086 y 0.091 kg/GWh y una emisión total de 774 kg para CII y finalmente de 0.058 y 0.065 kg/GWh y una emisión total de 1000 kg para la planta de CETEPEC independientemente de que consuman carbón de EUA o de Australia.

Finalmente, la emisión total de las tres carboeléctricas (utilizando la concentración de Hg en el carbón) se ubicó en 5477 kg considerando que CETEPEC consume carbón de EUA y de 5507 si consume carbón de Australia, al aplicar FE este valor fue de 2626 kg.

Para el año 2013 el **cuadro I** muestra en resumen que la tasa de emisión (kg/GWh) no varía considerablemente respecto a los datos de 2012 y que la emisión total de las tres carboeléctricas fue de 5341 kg consumiendo carbón de EUA en CETEPEC y 5370 kg

consumiendo carbón de Australia. Para el caso de aplicar FE la emisión total fue de 2462 kg.

En la **figura 2** son presentadas las emisiones de mercurio por mes y para cada unidad de generación en la central carboeléctrica JLP, mientras que en las **figuras 3 y 4** se presenta esta misma información para las carboeléctricas CII y CETEPEC, respectivamente. De lo anterior se observa que la Planta JLP presentó su mayor emisión durante el mes de agosto de 2012 con casi 14 kg/mes para cada una de las cuatro unidades de generación. Para la planta CII se observó una mayor emisión en la unidad de generación número 1 (U1) durante los meses de junio, julio y agosto, con un valor por arriba de 12 kg/mes. Finalmente la CETEPEC, que es la planta con el mayor número de unidades de generación (siete) es la que mayores emisiones presentó, tan sólo la U7, que es la de mayor capacidad, emitió arriba de 120 kg/mes durante el periodo de mayo a agosto de 2013. Las emisiones reportadas como cero indican que las unidades de generación se encontraron fuera de operación.

La **figura 5** explica la existencia de una relación directa entre la generación de electricidad (GWh) y las emisiones de Hg para los años 2012 y 2013 para las plantas en estudio (JLP, CII y CETEPEC).

La **figura 6** muestra graficas de cajas por unidad de generación para cada una de las tres carboeléctricas, observándose que algunas unidades de generación presentan valores que indican un funcionamiento intermitente, debido a diferentes factores de operación en las plantas carboeléctricas, así también se puede observar que la U7 de CETEPEC trabajó en condiciones máximas de operación debido a que es la unidad de mayor capacidad de carga de carbón.

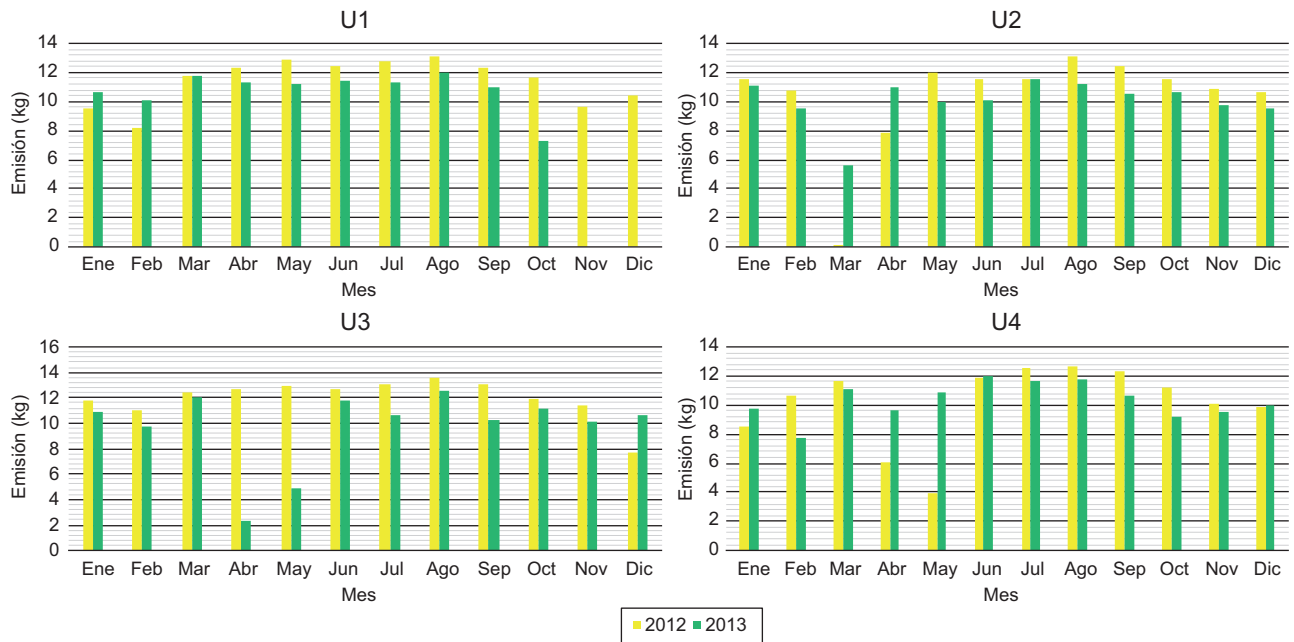


Fig. 2. Estimación de las emisiones por unidad de generación para la carboeléctrica JLP para los años 2012 y 2013.

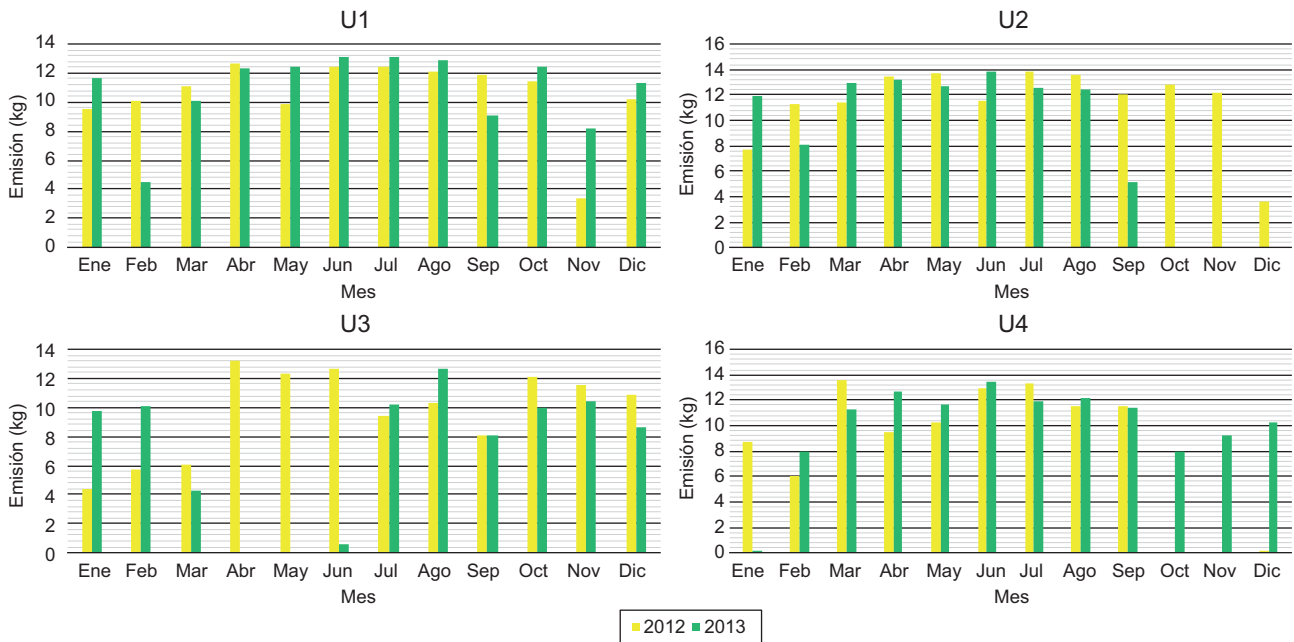


Fig. 3. Estimación de las emisiones por unidad de generación para la carboeléctrica CII para los años 2012 y 2013

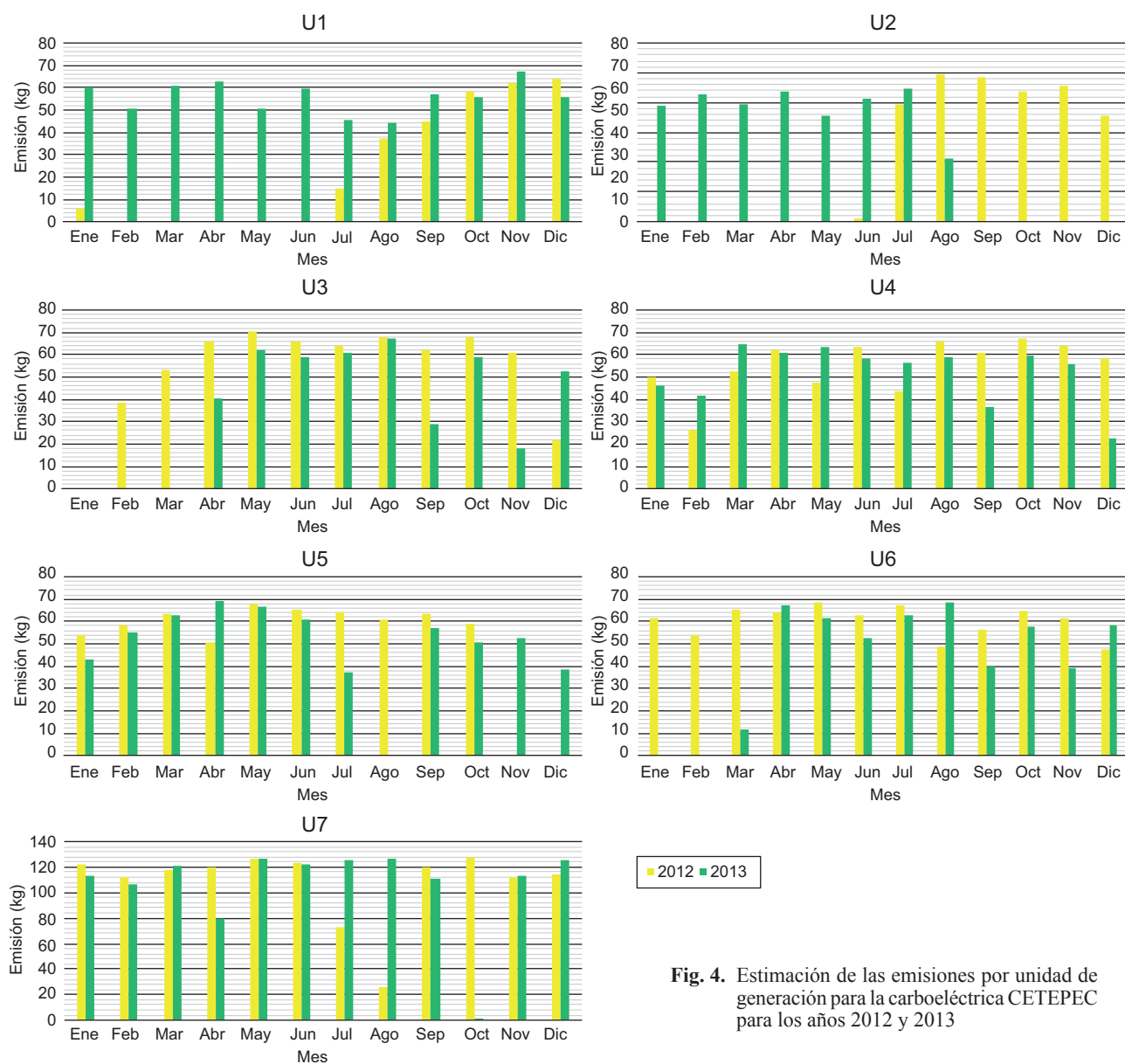


Fig. 4. Estimación de las emisiones por unidad de generación para la carboeléctrica CETEPEC para los años 2012 y 2013

CONCLUSIONES

Se logró realizar la estimación de las emisiones de Hg con base en su contenido en el carbón, así como mediante la aplicación de factores de emisión a partir de los datos reales mensuales de carbón consumido por unidad de generación para cada una de las tres centrales estudiadas.

La planta CETEPEC cuenta con el mayor número de unidades de generación, el mayor consumo de carbón y la mayor emisión de Hg, siendo la unidad 7 la que genera la emisión más alta.

La estimación de las emisiones totales considerando

las tres centrales carboeléctricas, obtenidas a partir del contenido de mercurio se encuentra en el intervalo de 309 kg a 23 180 kg para el año 2012 y de 290 kg a 21 716 kg para el año 2013. Para el caso de aplicar factores de emisión estos valores son: de 618 kg a 4635 kg para el año 2012 y de 868 kg a 4343 kg para el año 2013.

La información proporcionada por la CFE sobre la generación de energía eléctrica (MWh) es directamente proporcional a las emisiones de Hg determinados en este estudio en las tres carboeléctricas en funcionamiento en México.

La época del año que presenta mayores emisiones

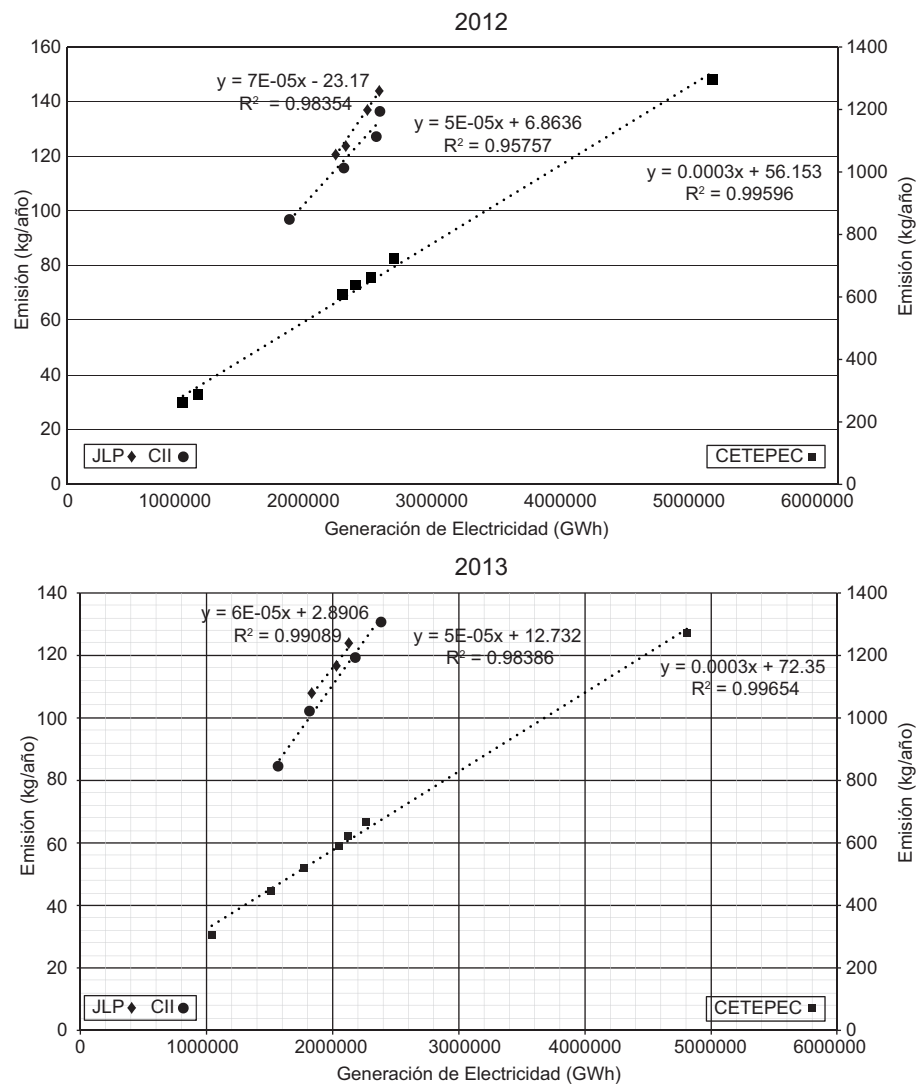


Fig. 5. Correlación entre la generación de energía eléctrica (GWh) y la emisión de Hg para los años 2012 y 2013

de Hg es el verano debido al mayor consumo de carbón asociado al mayor requerimiento de energía eléctrica durante esta época.

RECOMENDACIONES

Es necesario estimar diariamente las emisiones de Hg en las centrales carboeléctricas, para obtener un mayor número de datos y obtener factores de emisión que permitan evaluar de una manera más detallada la variación temporal de dicho contaminante.

Establecer políticas energéticas para la toma de decisiones en el proceso de prevención, minimización y control del impacto ambiental por la emisión de este contaminante.

Desarrollar límites de emisión de Hg considerando el tipo de carbón consumido en las carboeléctricas en México (sub bituminoso). Por ejemplo, en EUA los límites para las carboeléctricas que usan carbón bituminoso y de lignito son de 0.0017 mg/m^3 y de 0.0153 mg/m^3 respectivamente.

Llevar a cabo el monitoreo continuo de las emisiones de las centrales carboeléctricas en México. Con base en los resultados obtenidos sobre las emisiones reales de Hg, proponer las tecnologías de control más adecuadas, como las trampas absorbentes utilizadas a nivel mundial para el cumplimiento de los límites de emisión (NRDC 2016).

También es importante que dentro de las estrategias de prevención, minimización y control de las emisiones de Hg, se establezcan políticas de eficiencia

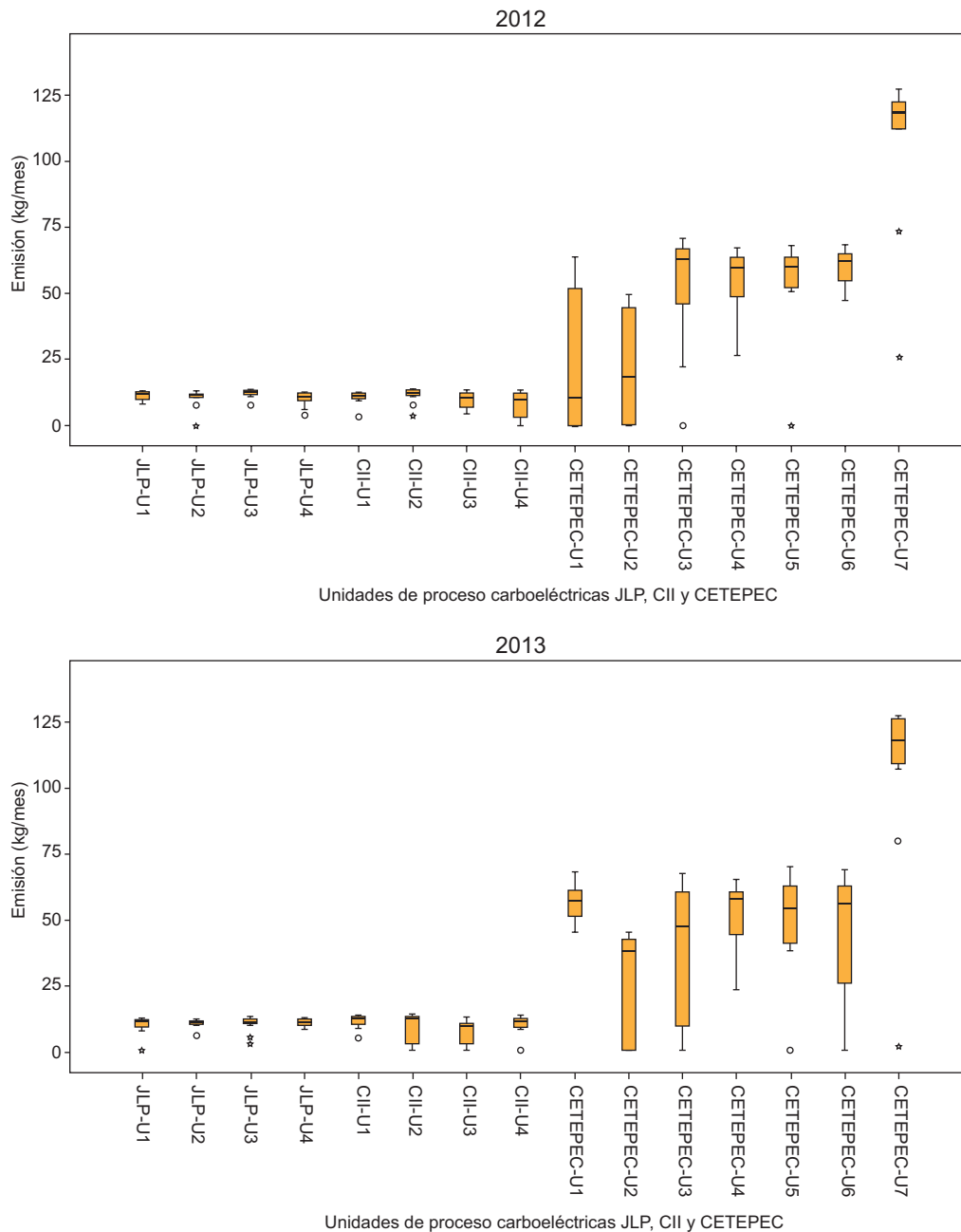


Fig 6. Gráfica de cajas para las emisiones de Hg por unidad de generación durante los años 2012 y 2013

energética dentro de las centrales carboeléctricas, que permitan producir la energía eléctrica para cubrir la demanda del país reduciendo el consumo de carbón.

Al establecer políticas de eficiencia energética en las carboeléctricas sería menester contar con información precisa sobre el tipo de carbón utilizado, ya que los organismos encargados de publicar esta información (Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Energía) no especifican de una forma

clara qué tipo de carbón es consumido en cada una de las carboeléctricas.

Los escenarios posibles por el consumo de carbón en México y a nivel mundial crecerán indudablemente, debido a diferentes factores que influyen en la demanda de energía eléctrica. Por lo cual, es preciso atender esta problemática para seguir generando la energía que se requiere, sin afectar al ambiente y al ser humano.

Es importante realizar análisis químicos al carbón consumido en las tres carboeléctricas en México, que permitan tener mayor información sobre su contenido de Hg y diseñar o instrumentar las políticas necesarias para su utilización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, M. en Ing. Ana Luisa Alarcón Jiménez y la Quím. María del Carmen Torres Barrera por su colaboración en la realización de esta investigación. Asimismo, a la Dra. Claudia García Landa por la revisión del manuscrito y finalmente a la Comisión Federal de Electricidad por la información técnica de las centrales carboeléctricas estudiadas.

REFERENCIAS

- AIE (2014). Energy statistics of OECD countries. Agencia Internacional de Energía [en línea]. http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-statistics-of-oecd-countries_19962827-en 07/08/2016
- Bravo A.H., Sosa E.R., Manjarrez D.C.A., Fuentes G.G., Sánchez A.P. (2012). Estimación de emisiones de mercurio (Hg) producto de la operación de Centrales Carboeléctricas en México. Informe final. Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM-Comisión Federal de Electricidad. Diciembre.
- CCA (2001). Inventario preliminar de emisiones atmosféricas de mercurio en México. Comisión para la Cooperación Ambiental [en línea]. http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/mxhg_airefinal_todo_v3.pdf 07/08/2016
- CEC (2011). Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte Commission for Environmental Cooperation, 80 pp. [en línea]. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/10236-north-american-power-plant-air-emissions-es.pdf> 07/08/2016
- CFE (2012). Boletín de Prensa: <http://saladeprensa.cfe.gob.mx/boletines/show/7982/>. Comisión Federal de Electricidad. 01 de Noviembre de 2012.
- ECCAD (2015). AMAP Mercury, Arctic Monitoring and Assessment Program Mercury inventory, for years 1995 and 2000. Emissions of Atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data [en línea]. http://eccad.sedoo.fr/eccad_extract_interface/JSF/page_statistique.jsf 07/08/2016
- EPA (1997). Locating and estimating air emissions from sources of mercury and mercury compounds. Environment Protection Agency [en línea]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/le/mercury.pdf> 07/08/2016
- EPA (2008). Characterization of coal combustion residues from electric utilities – leaching and characterization data. Environmental Protection Agency [en línea]. <https://swap.stanford.edu/20110203094339/http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r08077/600r08077.pdf> 07/08/2016
- EPA (2015). Emissions factors & AP 42, compilation of air pollutant emission factors. Environment Protection Agency [en línea]. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/> 07/08/2016
- Glodek A. y Pacyna J.M. (2009). Mercury emission from coal-fired power plants in Poland. Atmos. Environ. 43 (35), 5668-5673. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.07.041
- INE (2015). El sector eléctrico en el mundo y en México. Capítulo 1. Instituto Nacional de Ecología [en línea]. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/496/cap1.html> 07/08/2016
- IPEN (2015). Introducción a la contaminación por mercurio para las ONG. Red internacional de eliminación de los contaminantes orgánicos persistentes. PO Box 173, Bangalow NSW 2479 Australia. International POPs Elimination Network [en línea] http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/INC2/IPEN%20NGO%20Guide%20to%20Mercury%20Pollution_Spanish.pdf 07/08/2016
- Mugica V., Amador M.A., Torres M y Figueroa J.J. (2003). Mercurio y metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración. Rev. Int. Contam. Ambie. 19, 93-100.
- NRDC (2016). Summary of recent mercury emission limits for power plants in the United States and China. Natural Resources Defense Council [en línea]. <http://www.nrdc.org/international/files/china-us-mercury-limits-FS.pdf> 07/08/2016
- OMS (2013). Mercurio, evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. Organización Mundial de la Salud [en línea]. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78130/1/9789243596570_spa.pdf 07/08/2016
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Steenhuisen F. y Wilson S. (2006). Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. Atmos. Environ. 40 (22), 4048-4063 DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.041
- Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R.B., Friedlin H.R., Leaner J., Mason R., Mukherjee A.B., Stracher G.B., Streets D.G. y Telmer K. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. Atmos. Chem. and Phys. 10 (13), 5951-5964. DOI: 10.5194/acp-10-5951-2010

- PNUMA (2013). Convenio de Minamata sobre mercurio: textos y anexos. [en línea]. http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata%20Convention%20on%20Mercury_booklet_Spanish.pdf 07/08/2016
- SE (2014). Perfil del mercado del carbón. Coordinación general de minería. Secretaría de Economía [en línea] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5564/pm_carbon_2014.pdf 07/08/2016
- SENER (2012). Balance nacional de energía. Comercio exterior de energía primaria. Secretaría de Energía, Ciudad de México, México, 138 pp.
- SENER (2013). Balance nacional de energía. Comercio exterior de energía primaria. Secretaría de Energía [en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41975/Balance_2013.pdf 07/08/2016
- SENER (2015a). Sector Eléctrico Nacional, Subsecretaría de Electricidad. Capacidad efectiva de generación. Secretaría de Energía [en línea]. <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html> 07/08/2016
- SENER (2015b). Sector Eléctrico Nacional, Subsecretaría de Electricidad. Datos técnicos de las principales centrales de la CFE en operación en 2014. Secretaría de Energía [en línea] <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html> 07/08/2016
- SENER (2015c). Sector Eléctrico Nacional, Subsecretaría de Electricidad. Consumo de combustibles. Secretaría de Energía [en línea]. <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html> 07/08/2016
- SRWE (2014). Workbook. Coal consumption. I St James's Square London SW1Y 4PD. Statistical Review of World Energy [en línea]. http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf 07/08/2016
- Streets D.G., Zhang Q y Wu Y. (2009). Projections of global mercury emissions in 2050. *Environ. Sci. Technol.* 43 (8), 2983-2988. DOI: 10.1021/es802474j
- Tian H., Wang Y., Xue Z., Qu Y., Chai F y Hao J. (2011). Atmospheric emissions estimation of Hg, As, and Se from coal-fired power plants in China, 2007. *Science of the Total Environment.* 409 (16), 3078-3081. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.039
- Zhou J., Lou Z., Zhu Y. and Fang M. (2013). Mercury emission and its control in chinese coal-fired power plants. Zhejiang University Press, Hangzhou. Springer, Zhejiang, China, 154 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-37874-4