

## Externalidades atmosféricas asociadas a las centrales termoeléctricas cubanas en el año 2015

### Atmospheric externalities associated with the Cuban thermoelectric power plants in 2015



Elieza Meneses Ruiz <sup>1\*</sup>, Alina Roig Rassi <sup>1\*</sup>, Diosdado Alonso García <sup>1</sup>, <http://opn.to/a/39fhX>  
Ernesto Paz Ortega <sup>1</sup>, Jorge Alvarado Cartaya <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGIA, La Habana, Cuba.

**RESUMEN:** El presente trabajo constituye una actualización en las metodologías de estimación de los costos externos o externalidades atmosféricas durante la operación de las Centrales Termoeléctricas (CTE) en el país. Como metodología general se utiliza la metodología «Vías de impacto». Las actualizaciones fueron hechas en cada una de sus etapas. Para obtener el inventario de contaminantes emitidos se emplearon Factores de Emisión obtenidos de mediciones *in situ* que actualmente están siendo incorporado en diferentes estudios. Utilizando la herramienta SIMPACTS se realizaron las modelaciones de transporte de la contaminación atmosférica. El SIMPACTS en su versión actual es superior a sus versiones anteriores por tratar el transporte de contaminantes con el sistema de modelos CALMET-CALPUFF-CALPOST, que es actualmente el modelo regulatorio de la EPA para evaluar la dispersión de contaminantes en zonas de meteorología compleja y entre 50-300 km de la fuente de emisión. Este sistema de modelos se ajusta perfectamente al dominio de modelación local y regional. Se realizó además una búsqueda y actualización de valores de Funciones Exposición-Respuesta para ello se utilizaron los estudios internacionales disponibles y más recientes. Se estimaron y (o) actualizaron nuevos costos en salud para los efectos seleccionados a partir de estudios más recientes, entre ellos EPA, 2017. Los resultados obtenidos para el año 2015 muestran valores de externalidades entre 0.02-0.64 centavos CUC/kWh.

**Palabras clave:** Externalidades, Centrales Termoeléctricas, Contaminación Atmosférica.

**ABSTRACT:** The present work is an update in the methodologies of estimation of the external costs or atmospheric externalities during the operation of the Thermoelectric Power Plants (TPP) in the country. As a general methodology, was used the Impact Pathways methodology. In each of its stages of the methodology were incorporated new updates. To obtain the pollutants emitted inventory, were also incorporated the Emission Factors obtained from *in situ* measurements. The SIMPACTS tool carried out the modeling transport of atmospheric pollution. The SIMPACTS current version is better to its previous versions in the step of pollutants transport, because was used the system models CALMET-CALPUFF-CALPOST, which is currently the regulatory model of the EPA to assess the dispersion of pollutants in complex meteorological areas and between 50-300 km from the emission source. This model perfectly fits modeling for the local and regional domain. In addition was carried out, a search and update of Exposure-Response Function values. The most recent and available international studies were used. New health costs and / or updated were estimated, for the effects selected from the most recently studies, including EPA, 2017. The results obtained for the year 2015, show values of externalities between 0.02-0.64 cents CUC/kWh.

**Key words:** Externalities, Thermoelectric Power Plant, Air Pollution.

\*Autores para correspondencia: Elieza Meneses Ruiz y Alina Roig Rassi. E-mail: [emeneses@cubaenergia.cu](mailto:emeneses@cubaenergia.cu), [arrassi@cubaenergia.cu](mailto:arrassi@cubaenergia.cu)

Recibido: 08/04/2019

Aceptado: 27/05/2019

## INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles produce diferentes impactos negativos. Los más significativos son a nivel local la contaminación atmosférica, a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global el cambio climático. Estos impactos son considerados Costos Externos o Externalidades cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía, y por tanto distorsionan la valoración económica.

Las sociedades modernas se encuentran ante el reto de poder «internalizar» los costos asociados a esos impactos; sin embargo, aunque no lleguen a ser propiamente internalizados, el simple hecho de conocerlos ayuda a crear condiciones más favorables para trazar políticas y estrategias con vistas a reducir las emisiones generadas por este sector, entre ellas la introducción de tecnologías de reducción o control de emisiones, el empleo de combustibles más eficientes y/o menos contaminantes, etc.

Los resultados de ExternE ([European Commission, 2005](#)) demostraron que las menores externalidades por su bajo impacto en la contaminación atmosférica corresponden a las tecnologías renovables, mientras que en las fósiles fueron superiores.

Por otra parte, el proyecto CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems) ([European Commission, 2008](#)), que tuvo como objetivo obtener una evaluación completa y coherente de los costos totales de las fuentes energéticas que incluían los costos externos y los privados, obtuvo como resultado que los menores costos totales correspondían a los ciclos combinados de gas, la hidroenergía, la biomasa y la energía eólica on-shore.

Los costos actuales de generación eléctrica en Cuba ([Cubadebate, 2014](#)) están en el orden de los 21.1 centavos USD/ kWh y 6.5 centavos CUC/ kWh entregado, superiores a los que la bibliografía reporta para las tecnologías fósiles más comunes. Las estrategias hasta 2030 están encaminadas a reducir estos costos en alrededor de 15 % y cambiar la matriz energética actual, aumentando la

participación de las fuentes renovables desde 4.6 % a 24 %.

Teniendo en cuenta los elevados costos de generación y sin considerar los costos ambientales, es posible evaluar diversas tecnologías para su introducción en la matriz energética del país. Sin embargo, es importante evaluar los costos ambientales de cada tecnología, pues no existe ninguna absolutamente limpia.

En este artículo se presentan las metodologías y resultados obtenidos de los costos externos o externalidades de la generación por Centrales Termoeléctricas (CTEs) en el país durante el año 2015, por el empleo de combustibles fósiles (mayormente crudo nacional). Los resultados para la generación termoeléctrica están entre de 0.04-1.03 centavos de CUC/kWh. Las metodologías empleadas, aunque en su esencia siguen una metodología general, en cada una de sus etapas se han realizado modificaciones ya sea por la actualización de los datos empleados, o por la utilización de modelos al nivel actual del estado del arte no incorporados en estudios previos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

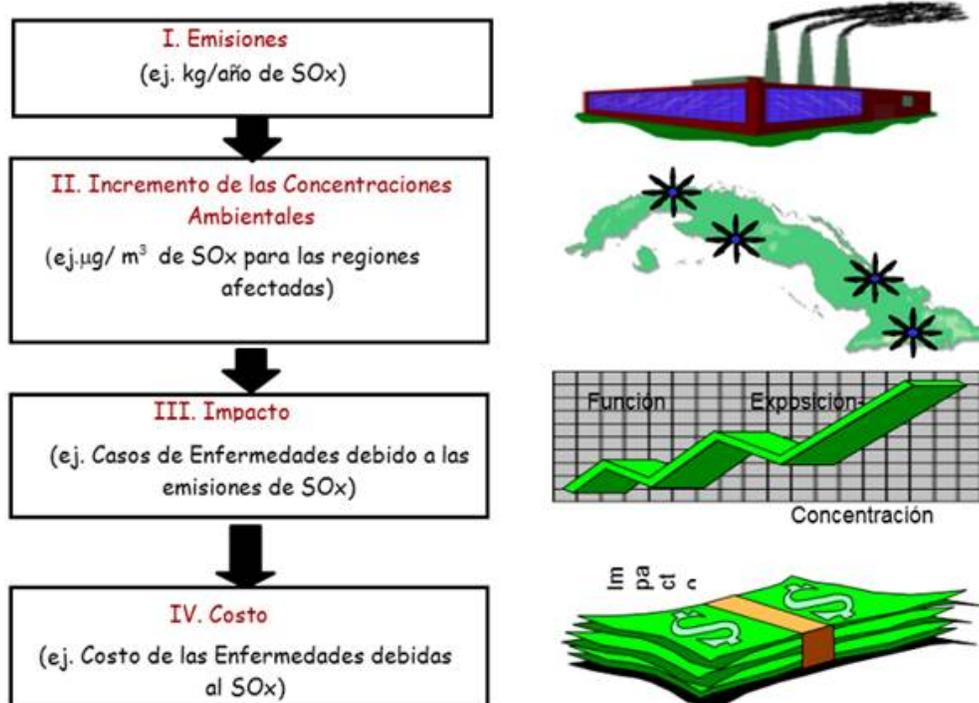
Para evaluar las externalidades de la generación termoeléctrica se aplica la metodología Vías de Impacto, la cual cuenta con cuatro etapas fundamentales, ver [figura 1](#).

### Metodología para estimar el inventario de contaminantes emitidos

La primera etapa de esta metodología ([Meneses, et al., 2015](#)) es la caracterización de la fuente emisora que incluye la localización de la fuente, los datos de la chimenea y los flujos de contaminantes emitidos, entre otros.

Para estimar las emisiones se empleó el método de factores de emisión (FE), esta vez utilizando factores propios obtenidos a partir de mediciones directas de gases en las centrales termoeléctricas cubanas ([Meneses, et al., 2017](#)), y los valores que se toman para el estudio se muestran en la [tabla 1](#). Estos valores incluyen el rango de incertidumbre asociado.

Cada CTE constituye una fuente de emisión. La [tabla 2](#) muestra los datos de localización, altura y



Fuente: Elaboración propia con base en [European Commission, ExternE, 2005](#)

**Figura 1.** Metodología Vías de Impacto. Contaminación atmosférica local y regional

**Tabla 1.** FE en gramos de contaminante por kg de combustible consumido en calderas de vapor y motores con intervalo de confianza

Tecnología	Factor de emisión (g/kg)			
	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
Crudo (calderas CTE)	25.2 ± 7.3	2892.6 ± 71.5	4.8 ± 1.3	128.9 ± 4.9
Fuel Oil (calderas CTE)	5.2 ± 3.7	3172.9 ± 12.7	4.4 ± 0.2	39.1 ± 0.5

diámetros de las chimeneas (chim.); así como la temperatura de salida de los gases. Ante la escasez de datos de mediciones de partículas en CTE, no ha sido posible estimar factores de emisión propios para este contaminante, por lo que se estimaron a partir de los factores de emisión de PM<sub>10</sub> filtrables, propuestos por la EPA para emisiones incontroladas en calderas de CTE quemando fuel oil residual tipo 6 en la AP-42, Sección 1.3 - (Fuel Oil Combustion, Final Section, Supplement E) ([EPA, 2010](#)).

La generación y el consumo de combustible por unidad se obtuvieron de los registros de la Unión Eléctrica (UNE) para el año 2015. Por lo general una misma unidad usó diferentes tipos combustibles, ya sea por diferentes tipos de crudo (1400, 1100 o 650) o de fuel oil; se calculó una

composición ponderada en base al consumo. El contenido de azufre (S) usado para cada CTE aparece en la [tabla 3](#).

Las emisiones obtenidas para cada una de las centrales, así como las velocidades de salida de los gases, se muestran en la [tabla 4](#).

### Modelación de la dispersión de contaminantes

La dispersión de contaminantes atmosféricos y consecuentemente las evaluaciones de sus afectaciones a la calidad de aire, constituye la segunda etapa de la Metodología Vías de Impacto. Para el transporte de los contaminantes se propone el uso del modelo CALPUFF, regulatorio de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés y utilizado en Cuba con anterioridad para varios estudios).

**Tabla 2.** Datos de las fuentes

CTE/ No Unidades	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura chim. (m)	Diámetro de la chim. (m)	Temperatura (°C)
CTE Máximo Gómez 4 Unidades de 100 MW	23.02	82.75	65	6.0	160.06
CTE Antonio Guiteras Unidad de 330 MW	23.06	81.55	150	10.2	150.00
CTE C. M. de Céspedes 2 Unidades de 158 MW	22.16	80.45	100	6.0	119.88
CTE 10 de Octubre 3 Unidades de 125 MW	21.57	77.27	180	6.5	153.75
CTE Antonio Maceo Unidad 3, 100 MW	19.99	75.87	120	5.0	161.29
Unidades 5 y 6, 100 MW			120	4.8	148.04
CTE Lidio R. Pérez 2 Unidades de 250 MW	20.72	75.59	150	7.0	157.64
CTE Este de La Habana 3 Unidades de 100 MW	23.16	81.95	180	6.0	170.00
CTE Otto Parellada Unidad de 64 MW	23.12	82.35	45.70	4.6	170.18

**Tabla 3.** Contenido de S ponderado para cada CTE

CTE	Contenido de S ponderado (%)
CTE Máximo Gómez	6.90
CTE Antonio Guiteras	6.90
CTE Carlos Manuel de Céspedes	2.12
CTE 10 de Octubre	6.90
CTE Antonio Maceo	2.12
CTE Lidio Ramón Pérez	7.13
CTE Este Habana	7.13
CTE Otto Parellada	2.12

El Sistema CALMET-CALPUFF ([Scire, et al., 2000](#)) fue desarrollado por EarthTech (Concord, MA) y es el modelo propuesto a partir del 2003 por la EPA como modelo de uso regulatorio para realizar la modelación detallada de los procesos de dispersión de contaminantes atmosféricos, en dominios regionales (a distancias de la fuente entre 50 y 200 km con valores aceptables hasta 300 km), y en dominios locales (entre 0 y 50 km de distancia de la fuente) en situaciones de vientos complejos (topografía compleja, cambios en el uso de suelo,

cañones urbanos), pues usa campos de vientos tridimensionales.

CALPUFF es un modelo de dispersión de tipo *puff*, gaussiano, de varias capas, de varias especies no estacionario, que simula los efectos del tiempo, el espacio y la variación de las condiciones meteorológicas en el transporte de contaminantes, su transformación y remoción ([Fonseca, et al. 2010](#)).

Para este tipo de modelaciones y como paso de avance a los estudios previos donde se utilizaba

solo un modelo local (ISCST3) (EPA, 1995) y una ecuación simplificada para evaluar la dispersión a escala regional (Spadaro, 2002), se propone el uso de CALPUFF para las CTE cubanas por estar todas ubicadas en zonas de vientos complejos (costas) y tener chimeneas altas que transporten los contaminantes más allá de los 50 km que es el máximo de confiabilidad en los modelos de alcance local.

Como resultado de esta etapa se brindan los incrementos de concentraciones en cada rejilla establecida para cada contaminante en cada una de las fuentes.

### Evaluación de impacto en salud y costos

La [tabla 5](#) muestra un resumen de los valores propuestos para la evaluación de los impactos y costos basados en las metodologías empleadas por (Meneses *et al.*, 2008 a, b) y actualizados con datos de 2015. La mortalidad, a diferencia de la morbilidad se expresa el Años de Vida Perdidos (AVP).

### Modelo SIMPACTS

El modelo SIMPACTS es la herramienta propuesta por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) para evaluar los costos externos de proyectos hídricos, nucleares y de combustibles fósiles. No es una herramienta flexible pues su objetivo es utilizar los resultados

**Tabla 4.** Emisiones en toneladas al año y velocidad de salida de los gases

CTE	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	Velocidad
	ton/año	ton/año	ton/año	m/s
CTE Máximo Gómez	42 734.3	2 283.7	2377.9	21.3
CTE Antonio Guiteras	53 985.1	2885.0	3004.0	9.5
CTE Carlos Manuel de Céspedes	16 426.8	1808.7	1016.9	6.2
CTE 10 de Octubre	60 322.4	3223.7	3356.6	10.3
CTE Antonio Maceo	9752.4	1073.8	603.7	10.4
CTE Lidio Ramón Pérez	92 220.2	4928.3	5131.5	14.6
CTE Este Habana	40 976.8	2189.8	2280.1	26.2
CTE Otto Parellada	2102.0	231.4	130.1	6.0

**Tabla 5.** Pendientes de las Funciones Exposición-Respuesta, S<sub>FER</sub>, expresadas en (casos o AVP/ (persona-año-µg/m<sup>3</sup>)) y costos unitarios por efectos en salud expresados en CUC

Efecto	S <sub>FER</sub> para PM10	S <sub>FER</sub> para SO <sub>2</sub>	S <sub>FER</sub> para NO <sub>2</sub>	S <sub>FER</sub> para sulfatos	S <sub>FER</sub> para nitratos	Costo por caso (CUC)
Bronquitis crónica	1.97·10 <sup>-5</sup>			3.28·10 <sup>-5</sup>	1.97·10 <sup>-5</sup>	121847
Infarto agudo de miocardio, no fatal	3.14·10 <sup>-6</sup>			5.24·10 <sup>-6</sup>	3.14·10 <sup>-6</sup>	51 576
Admisiones hospitalarias, respiratorias	1.76·10 <sup>-5</sup>	3.64·10 <sup>-5</sup>	4.58·10 <sup>-5</sup>	2.94·10 <sup>-5</sup>	1.76·10 <sup>-5</sup>	8707
Admisiones hospitalarias, cardiovasculares	5.88·10 <sup>-7</sup>			9.80·10 <sup>-7</sup>	5.88·10 <sup>-7</sup>	8803
Visitas a salas de urgencia (asma)	2.53·10 <sup>-5</sup>	3.29·10 <sup>-5</sup>	4.11·10 <sup>-5</sup>	4.21·10 <sup>-5</sup>	2.53·10 <sup>-5</sup>	116
Bronquitis aguda niños	8.42·10 <sup>-5</sup>			1.40·10 <sup>-4</sup>	8.42·10 <sup>-5</sup>	95
Días laborales perdidos	5.94·10 <sup>-2</sup>			9.91·10 <sup>-2</sup>	5.94·10 <sup>-2</sup>	30
Síntomas respiratorios	1.64·10 <sup>-6</sup>			2.74·10 <sup>-6</sup>	1.64·10 <sup>-6</sup>	68
Mortalidad aguda		1.41·10 <sup>-6</sup>	2.54·10 <sup>-6</sup>			31 711
Mortalidad crónica	1.92·10 <sup>-4</sup>			3.20·10 <sup>-4</sup>	1.92·10 <sup>-4</sup>	18 310

para que sean incorporados a los modelos de planificación energética. Tampoco es recomendable para estudios precisos de calidad de aire donde es necesario comparar con las normas existentes, ni permite la incorporación de nuevas fuentes renovables de energía (FRE), entre otras. Sin embargo, constituye una herramienta útil para evaluar el transporte de contaminantes atmosféricos al tener incorporado el sistema de modelos de CALMET-CALPUFF-CALPOST, sin necesidad de que sea acoplado con el modelo de pronóstico meteorológico WRF ([Capote Gil, et al., 2011](#)) pues se nutre de una base meteorológica tridimensional que sustituye los datos alimentados por este modelo; esto disminuye los tiempos de corridas de los modelos, casi imposible con las capacidades actuales de cálculo.

La opción de sustituir los datos meteorológicos tridimensionales suministrados por el modelo WRF, por los obtenidos del European Centre for Medium Range Weather Forecasts model (ECMWF), constituye la simplificación más importante de esta metodología. Al igual que otros modelos de dispersión con alto grado de complejidad y detalle, utiliza los datos de elevación de terreno y uso del suelo.

La [figura 2](#) muestra en forma gráfica los resultados obtenidos, tanto de características del terreno como meteorológicos para la CTE Otto Parellada en el dominio de modelación (200 km x 200 km), donde está incluida la ciudad de La Habana. Estos datos constituyen las salidas del modelo CALMET.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la modelación de la contaminación para el mismo caso de estudio ([Figura 3](#)). Cada figura representa los incrementos de las concentraciones ambientales del contaminante en las diferentes rejillas del dominio.

Las mayores concentraciones se localizan al suroeste coincidiendo con los vientos predominantes en el área de ubicación de la central.

### Datos de población

Para obtener los datos de población en la forma que se necesitan, independientemente de los métodos que se utilicen para las evaluaciones de

impacto, se precisa del uso de Sistemas de Información Geográfico. Para este trabajo se utilizó el sistema MapInfo V.9. Se enlazaron los datos de población por municipios según la división política administrativa de Cuba y las rejillas correspondientes a cada CTE. Se utilizaron los datos del 2015, obtenidos de las estadísticas nacionales ([ONEI, 2016](#)), ([Figura 4](#)).

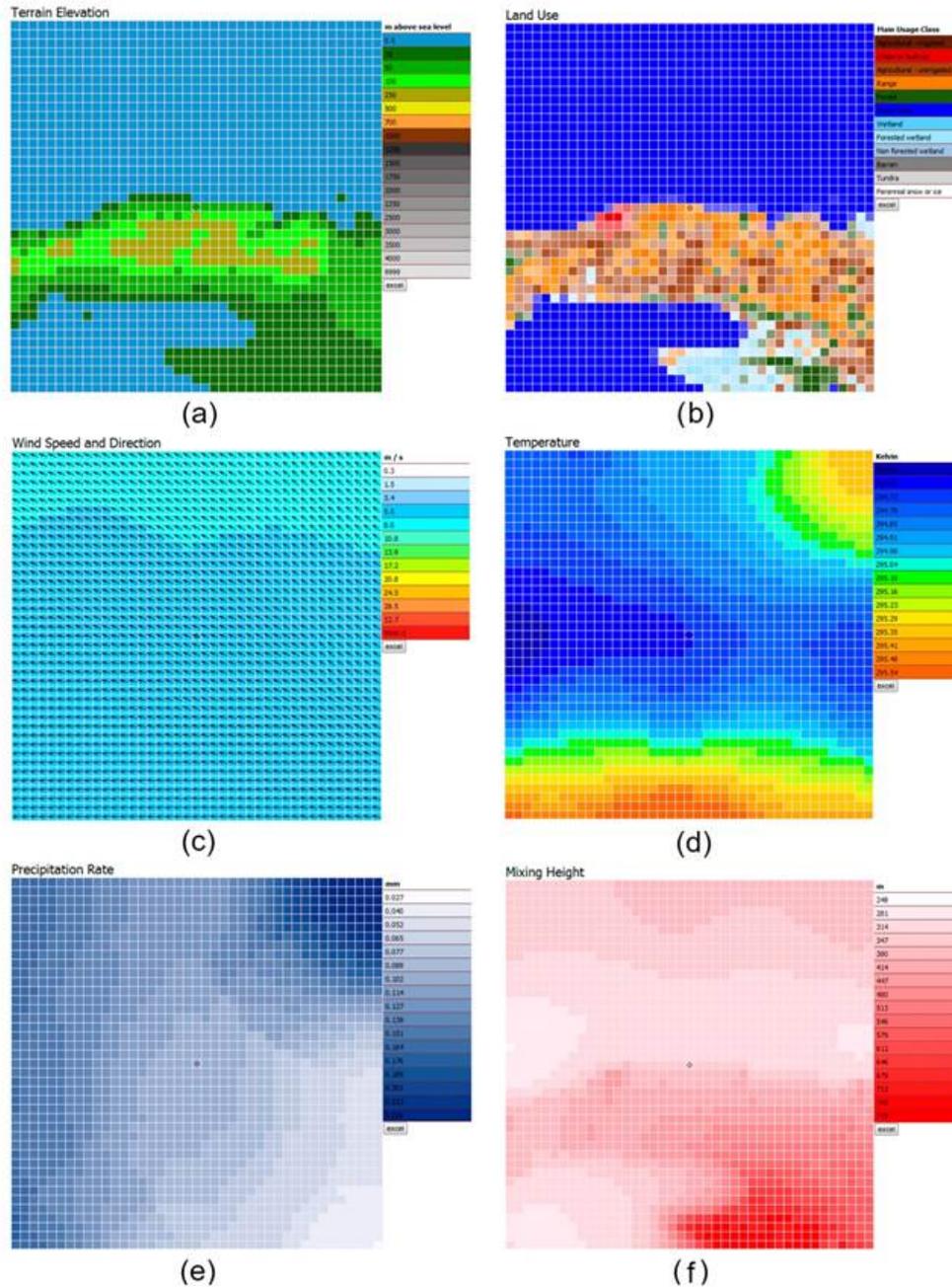
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de aplicar la metodología Vías de Impacto se llegó a los siguientes resultados: el monto total de los costos del daño para todas las CTE resultó de 38.24 millones de CUC, correspondiendo los valores más elevados a la CTE Antonio Guiteras, donde los costos se aproximaron a 24 % por encima de los costos totales para todos los casos evaluados ([Tabla 6](#)).

De forma general los mayores costos se le atribuyen a los sulfatos, resultando sus aportes cerca de 60 % de los costos totales por planta, exceptuando la CTE Otto Parellada donde el aporte de las partículas tiene el primer lugar por importancia; cabe señalar que esta Central se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de La Habana donde la densidad local de la población es elevada y por tanto aumenta el aporte de los contaminantes primarios como las  $PM_{10}$  y los  $SO_2$ . Para el resto de las plantas continuaron en orden de importancia los aportes de las partículas nitratos,  $SO_2$  y  $NO_x$ .

Al estimar solo los costos externos por el impacto en la salud humana, no estamos reflejando los costos externos reales que se obtienen en cada una de las plantas evaluadas, ya que faltan por incluir los impactos en otros receptores como son materiales, cultivos, ecosistemas, calentamiento global, etc. Sin embargo, es en la salud humana donde se han detectado existen los mayores impactos, representando más de 75 % de los costos totales de acuerdo a los resultados del proyecto CASES.

Al evaluar los resultados en CUC por tonelada de contaminante emitida, los mayores valores de impacto le corresponden a las partículas, seguidas por los  $SO_2$ , y  $NO_x$  como se observa en la [Tabla 7](#).



**Figura 2.** Resultados obtenidos con el modelo SIMPACT: (a) Representación de la elevación el terreno, (b) Representación del uso de suelo, (c) Representación de la velocidad y dirección del viento, (d) Representación de la temperatura, (e) Representación de la tasa de precipitación, (f) Representación de la altura de la capa de mezcla

Las CTE Otto Parellada presentó los costos más elevados para todos los contaminantes debido a su ubicación.

A partir de los costos totales se calcularon los costos específicos en centavos de dólar por kWh generado en las plantas. Los valores estimados de

estos costos oscilaron entre 0.02-0.64 centavos de CUC/kWh (Tabla 8), correspondiendo los valores más elevados a las Centrales Otto Parellada, Este-Habana, y Máximo Gómez, plantas ubicadas cerca o dentro de la Ciudad de La Habana. Es bueno señalar que estos costos además de depender de los

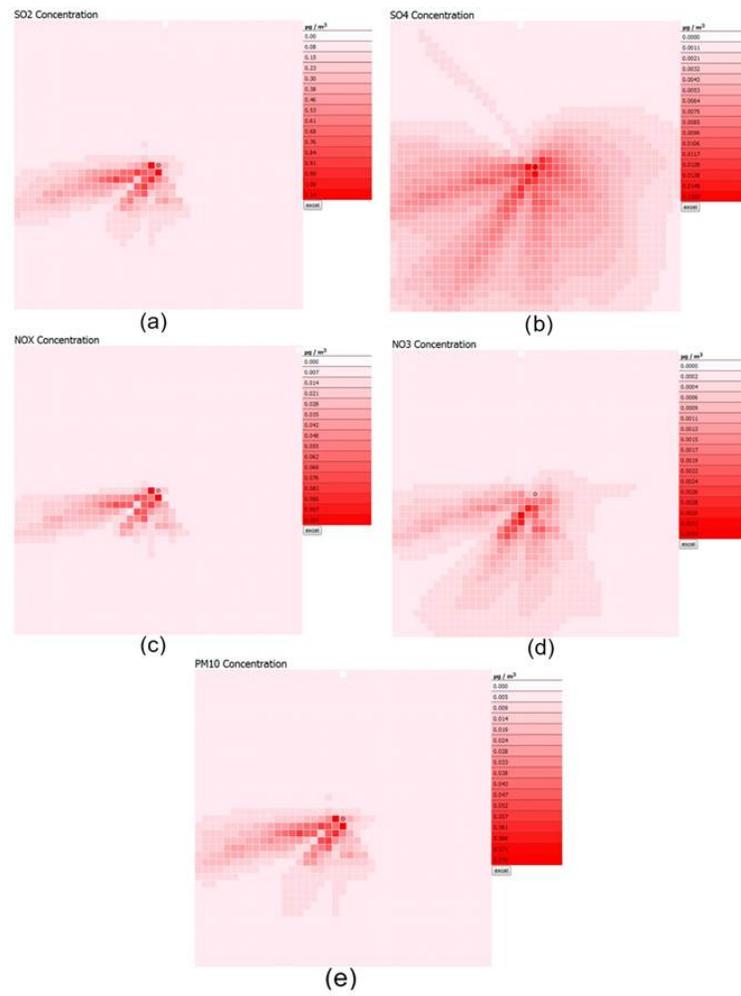


Figura 3. Representación de las concentraciones (a) SO<sub>2</sub>, (b) sulfatos, (c) NO<sub>x</sub>, (d) nitratos, (e) PM<sub>10</sub>

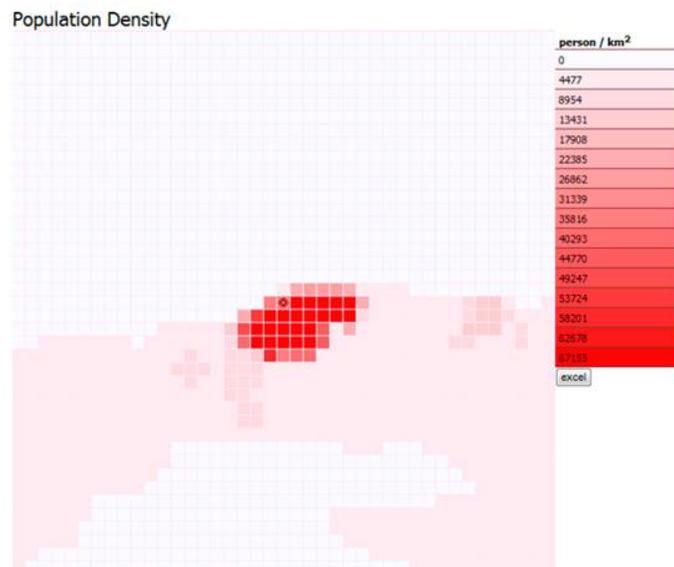


Figura 4. Representación de la distribución de población en el dominio de la CTE Otto Parellada

**Tabla 6.** Costos totales del daño en MM CUC por planta y tipo de contaminante

CTE	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Sulfatos	Nitratos	Costos Totales
CTE Máximo Gómez	0.51	0.41	0.006	2.37	0.03	3.33
CTE Antonio Guiteras	0.98	0.89	0.008	2.52	0.04	4.43
CTE C. M. Céspedes	0.11	0.08	0.006	0.21	0.01	0.42
CTE 10 de Octubre	0.54	0.52	0.012	1.17	0.02	2.27
CTE Antonio Maceo	0.04	0.04	0.002	0.10	0.00	0.18
CTE Lidio R. Pérez	0.97	0.99	0.029	2.79	0.05	4.83
CTE Este-Habana	1.29	1.26	0.026	2.17	0.04	4.79
CTE Otto Parellada	0.35	0.32	0.031	0.29	0.02	1.01

**Tabla 7.** CUC/tonelada de contaminante emitida

CTE	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
CTE Máximo Gómez	215.6	64.9	16.6
CTE Antonio Guiteras	325.4	63.2	15.8
CTE C. M. Céspedes	105.9	18.2	7.1
CTE 10 de Octubre	159.4	28.2	9.9
CTE Antonio Maceo	71.8	13.8	3.9
CTE Lidio R. Pérez	189.5	41.0	15.4
CTE Este-Habana	564.5	83.8	31.2
CTE Otto Parellada	2699.9	290.7	227.4

**Tabla 8.** Centavos CUC por kWh generado

CTE	Cent.CUC/kWh
CTE Máximo Gómez	0.27
CTE Antonio Guiteras	0.23
CTE C. M. Céspedes	0.02
CTE 10 de Octubre	0.12
CTE Antonio Maceo	0.02
CTE Lidio R. Pérez	0.17
CTE Este-Habana	0.37
CTE Otto Parellada	0.64

costos totales del daño dependen del nivel de generación de las plantas, pues existen plantas como la CTE Lidio R. Pérez con elevados costos totales del daño sin embargo al tener un alto nivel de generación sus costos específicos no son tan elevados.

Los impactos por mortalidad representaron 47 % de los costos totales del daño reservando el resto para la morbilidad. La bronquitis crónica y las admisiones hospitalarias respiratorias, representaron 30% y 20% de los costos totales del daño.

## CONCLUSIONES

A partir de actualizar las metodologías de evaluación de externalidades se obtuvieron los valores de costos del daño para las Centrales Termoeléctricas del país. El estudio estimó para el año 2015, costos totales de 21.26 millones de CUC anuales, correspondiendo los valores más elevados a las CTEs Lidio R. Pérez, Este-Habana y Antonio Guiteras, donde los costos se aproximaron a 22.7, 22.5 y 20.9 % de los costos totales del daño respectivamente.

De forma general los mayores costos se les atribuyen a los sulfatos resultando sus aportes cerca de 54.7 % de los costos totales por planta. Para la CTE Otto Parellada el aporte de las partículas tiene el primer lugar por importancia, debido a que esta Central se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de La Habana donde la densidad local de población es elevada y por tanto aumenta el aporte de los contaminantes primarios como las  $PM_{10}$  y los  $SO_2$ . Para el resto de las plantas continuaron en orden de importancia los aportes de las partículas,  $SO_2$ , nitratos y  $NO_x$ .

Al evaluar los resultados en CUC/tonelada de contaminante emitida, los mayores valores de impacto le corresponden a las partículas, seguidas por los  $SO_2$ , y  $NO_x$  en todas las centrales. Los costos en centavos de CUC por kWh oscilaron entre 0.02-0.64 correspondiendo los valores más elevados a las Centrales Otto Parellada, Este-Habana, y Máximo Gómez.

Los impactos por mortalidad representaron 47 % de los costos totales del daño reservando el resto para la morbilidad. La bronquitis crónica y las admisiones hospitalarias respiratorias, representaron 30 y 20 % de los costos totales del daño.

## REFERENCIAS

- Capote G., L. Turtós, L. Alvarez, A. Benzanilla, I. Borrajero (2011) «Implementación del WRF en Cuba para su uso en modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, Memorias del VI CONGRESO CUBANO DE METEOROLOGÍA, 29 Nov-2 Dic 2011». ISBN: 978-959-7167-29-7.
- CUBADEBATE (2014). «Mesa redonda del 12 de agosto de 2014, presente y futuro de la energía eléctrica en Cuba», available: «Mesa redonda del 12 de agosto de 2014, presente y futuro de la energía eléctrica en Cuba», available: <http://mesaredonda.cubadebate.cu/mesa-redonda/2014/08/12/presente-y-futuro-de-la-energia-electrica-en-cuba-2> , [consultado: abril 3, 2017].
- EPA (1995). «User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models». Vol.II-Description of Model Algorithms EPA-454/B-95-003b. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park
- EPA (2010). «External Combustion Sources», AP 42, Fifth Edition. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. US Environmental Protection Agency.
- European Commission (2005). ExternE, Externalities of Energy: Methodology 2005 Update, (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France
- European Commission (2008). Project No 518294 SES6, CASES - Cost Assessment of Sustainable Energy Systems, WP6 - DELIVERABLE D.6.1. "Full cost estimates of the use of different energy sources". Last update: September 2008
- Fonseca Y. (2010). «Implementación y aplicación del sistema de modelación CALMET-CALPUFF-CALPOST a escala local». Trabajo de Diploma, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC), Departamento de Ingeniería Nuclear.
- Meneses, *et al.* (2015). «Salida: Metodología establecida para evaluar las externalidades ambientales, desde la perspectiva de análisis de ciclo de vida de tecnologías energéticas, fósiles y renovables. Programa: Desarrollo Sostenible de las Fuentes Renovables de Energía». La Habana, marzo 2015.
- Meneses, *et al.* (2008 a). «Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Externalidades del transporte. Propuesta de funciones exposición-respuesta a emplear en los estudios de externalidades del transporte». La Habana, marzo 2008.
- Meneses, *et al.* (2008 b). «Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Externalidades del transporte. Valoración de los costos en salud para los efectos seleccionados». La Habana, septiembre 2008.

- Meneses, *et al.* (2017). «Factores de emisión de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba». *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.24, No.1, pp. 1-9, 2018, ISSN: 0864-151X
- ONEI, 2016. «Anuario Demográfico de Cuba 2015», Oficina Nacional de Estadísticas e Información, Centro de estudios de Población, Edición Junio de 2016.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. (2000). «A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5.0). Earth Tech, Inc., Concord, MA».
- Spadaro J. (2002). «airpacts Manuel (versión 1.0). A tool for assessing the environmental impacts and damage costs to human health, agricultural crops and man-made structures from exposure to routine atmospheric emissions. International Atomic Energy Agency (IAEA)», Vienna, Austria. October 2002.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Los autores de este trabajo declaran presentar una participación igualitaria en la concepción, ejecución y escritura de la investigación.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)