

Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros

Emission of air pollutants by sugar mills from Santiago de Cuba province

*Dr. C. Anel Hernández-Garcés^I, MSc. Mirtha Reynosa-Valladares^{II},
MSc. Francisco Hernández-Bilbao^{III}, MSc. Janet Canciano-Fernández^{II}*

^IFacultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba; ^{II}Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana, Cuba; ^{III}Empresa Azcuba, La Habana, Cuba

Resumen

La introducción de bioeléctricas con bagazo como combustible pudiera solucionar uno de los problemas más importantes en la actualidad: la contaminación atmosférica. Este trabajo estima el SO₂, los NO_x y el material particulado emitidos por generadores de vapor de centrales azucareros de la provincia Santiago de Cuba mediante factores de emisión. Los resultados pueden servir de precedente para la futura evaluación de las bioeléctricas. Como resultado se obtuvieron valores de emisión inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos pero varios ordenes superior que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible. La verificación de las emisiones con las Emisiones Máximas Admisibles de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes comprobó que para el MP y los NO_x de todas las chimeneas se superan los valores fijados. No obstante, para el SO₂ ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo legal.

Palabras clave: emisiones, central azucarero, contaminantes atmosféricos, generador de vapor.

Abstract

Introduction of bioelectric with bagasse as fuel could solve one of the most important problems at present: atmospheric pollution. This work estimates SO₂, NO_x and PM emitted by steam boilers from sugar mills in the province of Santiago de Cuba using emission factors as a precedent for the future evaluation of bioelectrics. As a result, lower emission levels were obtained than thermoelectric but several orders higher than those of conventional steam boilers that use hydrocarbons as fuel. Verification of the emissions with the Maximum Permissible Emissions of the NC/TS 803: 2010, for the category of Existing Sources verified that for the MP and the NO_x, all the chimneys exceed the fixed values. Nevertheless, for the SO₂ none of the emissions exceeds the legal maximum.

Keywords: emissions, sugar mill, air pollutants, steam boiler.

Introducción

La contaminación del aire constituye hoy uno de los problemas ambientales críticos del mundo debido a la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía. Esto conlleva la necesidad de profundizar en el conocimiento del impacto ambiental que ocasionan los contaminantes, su prevención y control, así como en el establecimiento de medidas que contribuyan a reducir los niveles de contaminación en aras del desarrollo sostenible.

La diversificación de la matriz energética a partir del fomento del uso de energías renovables pudiera ser una solución. En tal sentido, puede ser considerada la agroindustria cañera ya que brinda un potencial atractivo como fuente de cogeneración de energía eléctrica mediante la quema de bagazo [1].

Acorde a esto, en junio de 2014 fue aprobada la Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía en Cuba que estableció, entre otros objetivos, la instalación de 755 MW en bioeléctricas. A continuación, González-Corzo [2] reportó una potencialidad anual de 5 000 GWh y evaluó 5 alternativas de implementación.

De forma paralela Torres *et al.* [3] demostraron la factibilidad económica del empleo de los subproductos de la caña de azúcar como el bagazo y otros residuales de la cosecha que pueden ser empleados por las plantas bioeléctricas en la producción de energía así como otros residuos de origen forestal o agrícola.

El bagazo es empleado como combustible en otros países. Bocchi y Oliveira [4] indicaron que el bagazo era la biomasa más utilizada para la generación de vapor. A su vez, Shah y otros [5] pusieron de ejemplo al bagazo de la caña de azúcar como un combustible alternativo capaz de minimizar las emisiones contaminantes en comparación con los hidrocarburos.

No obstante al quemar biomasa cañera, las bioeléctricas emiten gases contaminantes [6]. Siempre este peligro está presente y depende, entre otros, de la existencia de sistemas de tratamiento, del estado técnico de las calderas y de la composición de la biomasa.

Diversos investigadores han abordado el cálculo de emisiones provenientes de la quema del bagazo. A partir de estudios de laboratorio de SO₂ y NO_x, Gadi *et al.* [7] obtuvieron factores de emisión de varios biocombustibles y concluyeron que el bagazo tiene los menores valores para SO₂. Sin embargo, para los NO_x se obtuvieron valores superiores. Luego, DIGESA [8] precisó que el 73,7 % de las emisiones de óxidos de nitrógeno del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas de la Cuenca Atmosférica de la ciudad peruana de Trujillo es atribuida a la industria azucarera, con 162 t/año, debido en su totalidad a la combustión del bagazo de caña de azúcar. De modo simultáneo, Gil [9] evaluó los efectos ambientales que produce la generación de energía a partir de bagazo en el central espirituano “Melanio Hernández” y utilizó el software DECADES para obtener factores de emisión.

Posteriormente, Kawashima *et al.* [10] presentaron el inventario de emisiones sobre la base de las plantas de energía que queman bagazo de la caña de azúcar, uno de los combustibles utilizados con mayor frecuencia para generar electricidad en Brasil cuyo uso se ha extendido gradualmente para satisfacer la demanda de energía.

Recientemente, Hernández-Garces *et al.* [11-19] estimaron las emisiones provenientes de los centrales azucareros de las provincias de Mayabeque, Ciego de Ávila, Cienfuegos, Sancti Spíritus, Guantánamo, Camagüey, las Tunas, Holguín y Granma en Cuba, utilizando factores de emisión. Mientras, otros investigadores han calculado las emisiones con un enfoque climático [20].

Como objetivo de este trabajo se propone, partiendo de la discusión anterior, estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos (SO₂, NO_x y MP) emitidos por las calderas de centrales azucareros santiagueros como antecedente para la futura evaluación de las emisiones de las bioeléctricas.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Fueron elegidos los generadores de vapor de los centrales de la provincia Santiago de Cuba por encontrarse en una zona de topografía compleja, localizarse en los alrededores de una ciudad densamente poblada, con zonas industriales importantes y para sentar las bases de la evaluación de las futuras

bioeléctricas (figura 1). Todos los datos empleados en el estudio se corresponden con la zafra 2016-2017.

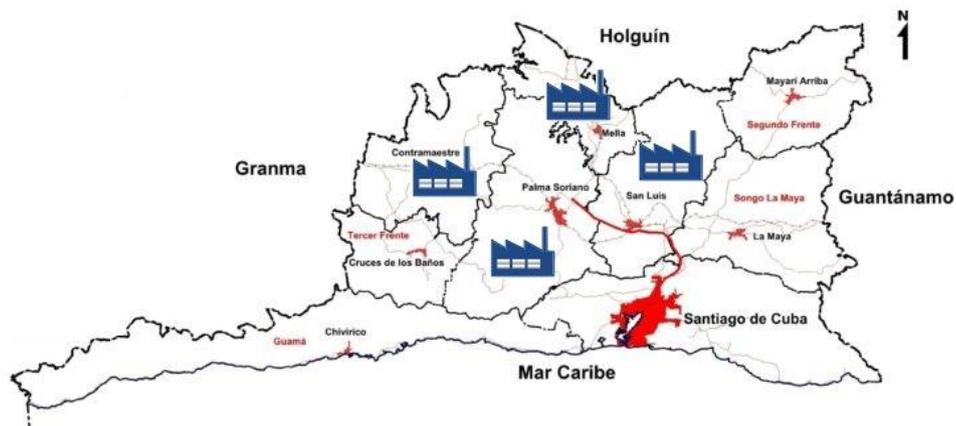


Fig. 1- Localización de los centrales en la zona de estudio.

Los contaminantes atmosféricos emitidos se estimaron a partir de la ecuación (1), recomendada por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA) [21], y se utilizaron los factores de emisión divulgados por esta agencia en la serie AP 42 para fuentes puntuales o estacionarias [22].

$$E = A \cdot f \cdot \left[1 - \frac{\epsilon}{100} \right] \quad (1)$$

donde:

E: es la emisión (g/s),

A es el consumo de combustible (kg/s),

f es el factor de emisión no controlada (g/kg), y,

ϵ es la eficiencia de reducción de emisiones (%), cuando se utiliza tecnología de reducción. Como no existe tecnología de reducción de emisiones, entonces $\epsilon=0$.

La EPA omite al SO_2 [22], pese a ello, se incluye en el presente trabajo debido a la importancia de este contaminante criterio, uno de los cuales con el que se establecen los niveles de calidad de aire y en los que se basan los documentos normativos.

Con este fin se considera entonces el factor de emisión reportado por NPI [23] para el SO₂. Los factores de emisión tenidos en cuenta en el estudio se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1
Factores de emisión [22]

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7,8
NO _x	0,6

Tabla 2
Factores de emisión [23]

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
SO ₂	0,25

Diferentes autores han reportado una composición similar para el bagazo en la que subestiman la composición de azufre ya que las emisiones de SO₂ provenientes de la quema de bagazo son escasas [24]. La composición elemental reportada se muestra en la tabla 3.

Tabla 3
Composición elemental del bagazo [24-27]

Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno		Azufre
19,2 %	2,6 %	0,15		<0,1 %
44,6	5,8	0,6		0,1
42,2	5,47	0,23		0,0
42,54	5,17	0,63		0,3
47,0	6,5	-		0,0

Según la norma potencial de caña del central (tabla 4) y suponiendo que la misma generaba un 27 % de bagazo, se estimó la cantidad de bagazo quemado.

Tabla 4
Consumo de caña de los centrales

Central/Municipio	Cantidad de chimeneas	Cantidad de calderas	Consumo de caña (t/h)
América Libre/ Contramaestre	1	2	115
Dos Ríos/ Palma Soriano	1	2	192
Paquito Rosales/ San Luis	1	1	110
Julio Antonio Mella/ Mella	2	4	240

A continuación, se sustrajo un 8 %, cantidad guardada en la casa de bagazo para un futuro arranque de la caldera (tabla 5).

Tabla 5
Consumo de caña de las calderas

Central	Consumo de bagazo (t/h)	Temperatura salida gases de combustión (K)
América Libre	29	523
Dos Ríos	48	573
Paquito Rosales	27	493
Julio Antonio Mella	60	453

La temperatura de salida de los gases de combustión se promedió ya que algunos centrales poseen más de una caldera que emite a través de una misma chimenea.

El consumo de combustible, en kg/s, se calculó a partir de la masa de combustible gastado estimada anteriormente. Por otra parte, el flujo de gases se obtuvo por medio de la ecuación 2:

$$Q = V \cdot C \quad (2)$$

donde

Q es el flujo de los gases de combustión (m^3/s) para condiciones normales ($0\text{ }^\circ\text{C}$ y $101,3\text{ kPa mmHg}$)

V es el volumen de gases húmedos (Nm^3/kg) para condiciones normales, y

C es el consumo de combustible en kg/s.

Mientras, el volumen de gases V se determinó con los valores reportados por la EPA según la ecuación (3):

$$V = 22,4 \left[\left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{2} + \frac{P_S}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{n}{0,21} + \frac{P_{H_2}}{2} + \frac{P_{O_2}}{32} \right] \quad (3)$$

donde

P_C , P_{H_2} , P_S y P_{O_2} son las composiciones en tanto por uno de un combustible formado por carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno, y,

n es el coeficiente de exceso de aire. En este caso $n=1+\text{exceso de aire}$.

Resultados y discusión

Los resultados de las emisiones de los contaminantes atmosféricos producidos por las calderas estudiadas se muestran en la tabla 6.

Los estimados de caudal y emisión son menores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos pero son varios órdenes mayores que los de los generadores de vapor convencionales enclavados en distintas industrias e instituciones de la región que emplean hidrocarburos como combustible [28]. Este resultado coincide con Neto y Ramón [29] quienes cuantificaron las toneladas de NO_x dejadas de emitir por la quema de combustibles fósiles. Los valores mayores se corresponden además con los más altos consumos de bagazo.

Tabla 6
Emisiones y flujos volumétricos

Central	Emisiones (g/s)			Flujo de gases (m ³ /s)
	MP	NO _x	SO ₂	
América Libre	61,9	4,8	2,0	47,7
Dos Ríos	103,2	7,9	3,3	78,5
Paquito Rosales	59,3	4,6	1,9	19,4
Julio Antonio Mella, chimenea 1	96,7	7,4	3,1	87,3
Julio Antonio Mella, chimenea 2	32,2	2,5	1,0	9,7

Con el fin de presentar el inventario para toda la zafra y considerando 150 días de molienda se convirtieron los valores convenientemente (tabla 7). Luego para mostrar el aporte relativo se construyó un gráfico porcentual (figura. 2) a partir de los valores de MP evidenciando que el central Dos Ríos es el de mayor aporte al inventario de la provincia. Cualquiera de los otros dos contaminantes mostraría un comportamiento idéntico por depender todos ellos de iguales consumos de bagazo y factores de emisión.

Tabla 7
Emisiones y flujos volumétricos

Central	Emisiones (t)		
	MP	NO _x	SO ₂
América Libre	802,1	61,7	25,7
Dos Ríos	1 336,9	102,8	42,8
Paquito Rosales	768,7	59,1	24,6
Julio Antonio Mella	514,5	39,6	35,2

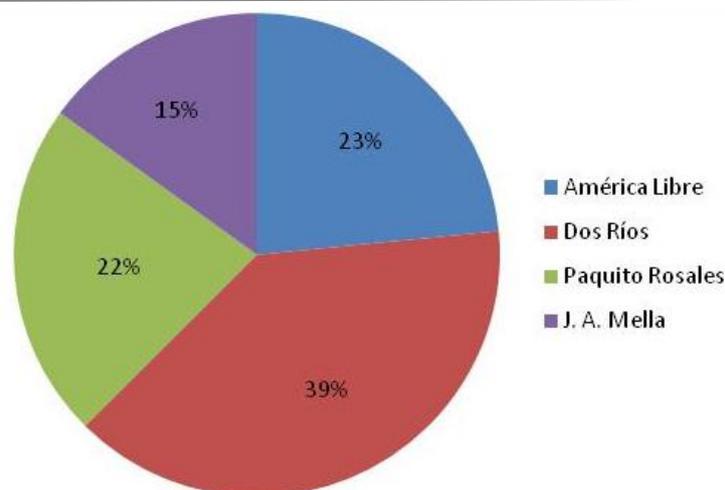


Fig. 2- Aporte de cada central a las emisiones.

Se han establecido las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) en dependencia de las características de las instalaciones [30]. Los generadores de vapor analizados en este trabajo se clasifican como c-1 (Calderas de vapor. Biomasa). Esta norma solo concierne a los contaminantes SO₂, NO_x y material particulado.

Con el fin de verificar las emisiones con esta norma, se convirtieron los valores de concentración de los contaminantes a unidades de mg/Nm³. Como resultado se obtuvo que todas las chimeneas sobrepasan los límites normativos para el MP y los NO_x (tabla 8). Lógicamente, el mayor aporte es del MP causado por el empleo de bagazo como combustible. Por otra parte, ninguna de las emisiones de SO₂ supera la EMA establecida en la norma cubana NC/TS 803: 2010 debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Se deben validar estas estimaciones determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

**Tabla 8
Comparación normativa de las emisiones**

Central	Emisiones (mg/Nm ³)		
	MP	NO _x	SO ₂
EMA Fuentes existentes	400	100	1000
América Libre	2486,9	191,3	79,7
Dos Ríos	2757,3	212,1	88,4
Paquito Rosales	5514,5	424,2	176,7
Julio Antonio Mella, chimenea 1	1838,9	141,5	58,9
Julio Antonio Mella, chimenea 2	5516,6	424,4	176,8

La dispersión puede ser causada por el aire fluyendo en torno a obstáculos e irregularidades de la superficie como pueden ser colinas y árboles; o por la diferencia en la velocidad y/o dirección del viento entre dos alturas sobre la superficie; o por burbujas de aire ascendiendo debido al calentamiento diurno de la superficie. La dispersión es además, un proceso de dilución que mezcla el aire ambiente con el penacho de partículas gobernado principalmente por la turbulencia atmosférica [31].

Fruto de la dispersión, las emisiones estudiadas en este trabajo deben influir básicamente en zonas rurales para las que se supone un uso agrícola del suelo. No deben afectar a las comunidades vecinas a los centrales si se tiene en cuenta la altura de las chimeneas. El área de influencia y los efectos de la inmisión de los contaminantes evaluados pudiera estimarse a través de la modelación de la dispersión de estas emisiones [32,33].

Debe evaluarse alternativas de solución a la emisión de contaminantes. Torres *et al.* [3] consideraron la gasificación del bagazo como una opción limpia y altamente eficiente para la generación de electricidad. Mientras, Ren *et al.* [34] estudiaron la torrefacción del bagazo con la consiguiente reducción de las emisiones de SO₂ y NO_x. Para las partículas Cassula *et al.* [35] propusieron el tratamiento de las emisiones con un lavador de gases.

Conclusiones

- 1. Se evaluaron los contaminantes atmosféricos procedentes de los generadores de vapor de centrales azucareros santiagoeros y como resultado se obtuvieron valores de emisión de varios ordenes mayores que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible, pero inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos.**
- 2. La comparación de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes demostró que para el MP y los NO_x de todas las chimeneas se superan los valores fijados. No obstante, para el SO₂ ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo legal.**

Agradecimientos

A los especialistas, a Rodolfo Arévalo del América Libre, a Liván Sánchez del Dos Ríos, a Raúl Álvarez del Paquito Rosales y a Alejandro Almenares del Julio Antonio Mella; por el suministro de los datos y especificaciones con que se realizó este trabajo.

Referencias bibliográficas

1. NOVA GONZÁLEZ, A. “Importancia económica y estratégica de la agroindustria de la caña de azúcar para la economía cubana”. *Transforming The Cuban Economic Model*, Bildner Center for Western Hemisphere Studies, The Graduate Center, CUNY, New York, 2013.
2. GONZÁLEZ-CORZO, M. “La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes”. Bildner Center, 2015.
3. TORRES, A. *et al.* “Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano”. *Centro Azúcar*. 2015, 42(1), pp.1-8.
4. BOCCHI, B. Y OLIVEIRA, S. “Estudo de viabilidade de cogeração de uma unidade de extração de óleo de palma integrada a uma usina de biodiesel”. PME 2600 - Projeto integrado III. Trabalhos de formatura Engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 10 pp, 2008.
5. SHAH, S. *et al.* “Comparative Emission Analysis Of Bituminous Coal, Sugarcane Bagasse and Rice Husk”. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*. 2016, 48(3), pp. 685-688.
6. DOMENECH-LÓPEZ, F. *et al.* “Diagnóstico preliminar de las emisiones gaseosas en la industria de los derivados de la caña de azúcar”. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*. 2011, 45(3), pp. 30–37.
7. GADI, R. *et al.* “Emissions of SO₂ and NO_x from biofuels in India”. *Tellus B*. 2003, 55(3), pp. 787-795.

8. Dirección general de salud ambiental (DIGESA). “Inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Trujillo”, Perú, 2005.
9. GIL UNDAY, Z. “Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba”. Estudio de caso “Melanio Hernández”. Tesis de Doctorado. Universitat de Girona, 2005.
10. KAWASHIMA, A. B. *et al.* “Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil”. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2015,3(6), pp. 72-76.
11. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros”. *Ecosolar*. 2016, 56, p.1-7.
12. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños”. *Universidad & Ciencia*. 2017, 6(2), pp. 17-26.
13. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos emitidos por centrales azucareros cienfuegueros”. *Universidad y Sociedad*. 2017, 9(2), pp. 70-74.
14. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros espirituanos”. *Márgenes*. 2017, 4(4), pp. 1-11.
15. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos procedentes del central azucarero “Argeo Martínez”, Guantánamo, Cuba”. *Hombre, Ciencia y Tecnología*. 2017, 21(3), pp. 7-14.
16. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Evaluación de las emisiones de contaminantes de centrales azucareros en Camagüey”. *Monteverdia*. 2018, 11(1), pp. 12-20.
17. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Centrales azucareros tuneros y contaminantes emitidos a la atmósfera”. *Innovación Tecnológica*. 2018, 24(1), pp. 1-8.

18. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros de la provincia de Holguín”. *Minería y Geología*. 2018, 34(3), pp. 360-370.
19. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A. *et al.* “Emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de centrales azucareros granmenses”. *Revista Granmense de Desarrollo Local*. 2018, 2(1), pp. 46-55.
20. REINOSA, M. *et al.* “Inventario de emisiones de dióxido de carbono procedentes de centrales azucareros de la provincia Mayabeque”. *Ecosolar*. 2016, 57, pp. 13-16.
21. Environmental Protection Agency (EPA). “Emissions Factors & AP-42”. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, 1998.
22. Environmental Protection Agency (EPA). “Emission factor documentation for AP-42, section 1.8 Bagasse combustion in sugar mills”. 1993.
23. National Pollutant Inventory (NPI). “Emission estimation technique manual for Combustion in boilers”. Version 3.6, 2001.
24. HASSUANI, S. J. *et al.* “Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash”. *PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC - Centro de Tecnologia Canavieira*. 1st edition, 2005.
25. MANALS-CUTIÑO, M. *et al.* “Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal”. *Tecnología Química*. 2015, vol. 35, núm. 2, p. 244-255.
26. OLIVA, D. Y ANTOLÍN, G. “Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado”. *Ecosolar*. 2003, núm. 3, p. 1-5.
27. Reyes, J. L. *et al.* “Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental”. *Ecosolar*. 2003, núm. 5, p. 1-7.
28. Cuesta Santos, O. *et al.* “Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas”. CITMA/AMA/Instituto de Meteorología. Resultado Científico, Resumen ejecutivo. La Habana, 20 pp, 2016.

29. NETO, V. C. Y RAMON, D. “Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucro-alcooleiro”. Contract NO. DE-AC36-99GO10337, Brasília, DF. 2002.
30. NC/TS 803 “Calidad del aire — emisiones máximas admisibles, en De contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor”. Oficina Nacional de Normalización, 2010.
31. LÓPEZ. C. “Introducción a la gestión de la calidad del aire”. *Modelación de la calidad del aire*. Instituto de Meteorología, 2006.
32. HERNÁNDEZ-GARCÉS, A *et al.* “Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones”. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*. 2015,3(2), pp. 1-17.
33. ORDOÑEZ-SANCHEZ, Y. C. *et al.* “Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio”. *Revista Cubana de Química*, 2018, 30(1), pp. 90-103.
34. REN, X. *et al.* “Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass”. *Fuel*. 2017, 188, pp. 310-323.
35. CASSULA, D. A. *et al.* “Estudo sobre a eficiência energética de fontes renováveis no Brasil: avaliação da utilização da biomassa da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica no setor sucroenergético”. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, ENGEMA XVII, São Paulo 2015.