



**Revista *Márgenes*. Vol.5, No.2, Abril-Junio, 2017**

***¿Cómo referenciar este artículo?***

Hernández-Garces, A., Reinosá Valladares, M., & Hernández Bilbao, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros espirituanos. *Revista Márgenes*, 5(2), 1-11, abril-junio. Disponible en: <http://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes/issue/view/536>

**TÍTULO: CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROCEDENTES DE CENTRALES AZUCAREROS ESPIRITUANOS**

**Autores:** Dr.C. Anel Hernández-Garces<sup>1</sup>, MSc. Mirtha Reinosá Valladares<sup>2</sup>, Lic. Francisco Hernández Bilbao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doctor en Ciencias en Ingeniería Química y Ambiental. Profesor Auxiliar del grupo de contaminación atmosférica del Centro de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Correo electrónico: [anel@quimica.cujae.edu.cu](mailto:anel@quimica.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup>Máster en Ingeniería Ambiental. Investigadora Agregada del Laboratorio de Química Inorgánica del Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana. Correo electrónico: [mirtha@inor.ciq.minem.cu](mailto:mirtha@inor.ciq.minem.cu)

<sup>3</sup>Licenciado en Pedagogía Especialidad Eléctrica. Especialista Superior en Termoenergética de Azcuba, La Habana. Correo electrónico: [francisco.bilbao@azcuba.cu](mailto:francisco.bilbao@azcuba.cu)

**RESUMEN**

La Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía en Cuba estableció como propósito la introducción de 755 MW en bioeléctricas con bagazo como combustible. Esta intención pudiera solucionar uno de los problemas más importantes en la actualidad: la contaminación atmosférica. Este artículo se propone como objetivo: estimar el SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y el MP emitidos por generadores de vapor de centrales azucareros de la provincia Sancti Spíritus mediante factores de emisión como precedente para la futura evaluación de las bioeléctricas. Se emplearon, como métodos teóricos, el hipotético-deductivo y la modelación que permitieron cumplir los objetivos propuestos. Como resultado se obtuvieron niveles de emisión inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos, pero varios órdenes superiores, que los de los generadores de vapor convencionales, emplean hidrocarburos como combustible. La verificación de las emisiones con las EMA de la

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes comprobó que para el MP y los NO<sub>x</sub> de todas las chimeneas superan los máximos fijados. Mientras, para el SO<sub>2</sub> ninguna de las emisiones sobrepasa el valor legal.

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

### **TITLE: AIR POLLUTANTS EMITTED BY SUGAR MILLS FROM SANCTI SPIRITUS**

#### **ABSTRACT**

The Perspective Development Policy of Renewable Sources and Efficient Use of Energy in Cuba established the purpose of the introduction of 755 MW in bioelectric with bagasse as fuel. This intention could solve one of the most important problems at present: atmospheric pollution. The objective of this work is to estimate the SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PM emitted by steam boilers from sugar mills in the province of Sancti Spíritus using emission factors as a precedent for the future evaluation of bioelectrics. Theoretic methods such as the hypothetic – deductive and the modeling were used which allowed to fulfill the suggested objectives. As a result, lower emission levels than thermoelectric and generators were obtained, but several higher orders, that those of conventional steam boilers, use hydrocarbons as fuel. Verification of the emissions with the EMA of the NC/TS 803: 2010, for the category of Existing Sources, verified that for the MP and the NO<sub>x</sub>, all the chimneys exceed the fixed maximums. Meanwhile, for the SO<sub>2</sub>, none of the emissions exceeds the legal value.

**Key words:** emissions; sugar mill; air pollutants; steam boiler.

#### **INTRODUCCIÓN**

La quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía y las subsiguientes emisiones a la atmósfera ha provocado uno de los problemas más importantes desde que se mostraron sus efectos: la contaminación atmosférica.

La diversificación de la matriz energética a partir del fomento del uso de energías renovables pudiera reducir el problema. La agroindustria cañera puede ser considerada, ya que ofrece un potencial atractivo como fuente de cogeneración de energía eléctrica mediante la quema de bagazo (Nova González, 2013). En consonancia, en junio de 2014 fue aprobada la Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

Uso Eficiente de la Energía en Cuba que estableció, entre otras intenciones, la instalación de 755 MW en bioeléctricas. A continuación, González-Corzo (2015) reportó una potencialidad anual de 5 000 GWh y analizó cinco alternativas de implementación. Simultáneamente, Torres et al. (2015) 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 por las plantas bioeléctricas en la producción de energía así como otros residuos de origen forestal o agrícola. Mientras, Shah et al. (2016) ejemplificaron al bagazo de la caña de azúcar como un combustible alternativo capaz de minimizar las emisiones contaminantes en comparación con los hidrocarburos.

No obstante, a pesar de quemar biomasa cañera, las bioeléctricas pueden emitir gases contaminantes (Domenech-López et al., 2011). Este peligro siempre está presente y depende, entre otros factores, del estado técnico de las calderas, de la existencia de sistemas de tratamiento y de la composición del combustible.

El cálculo de emisiones provenientes de la quema del bagazo ha sido abordado por numerosos investigadores. Gadi et al. (2003) obtuvieron factores de emisión de varios biocombustibles a partir de estudios de laboratorio de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , y concluyeron que el bagazo tiene los menores valores para  $\text{SO}_2$ . No obstante, para los  $\text{NO}_x$ , se obtuvieron los mayores valores. Luego, DIGESA (2005) 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 de Trujillo era atribuida a la industria azucarera, con 162 t/año, debido en su totalidad a la combustión del bagazo de caña de azúcar. A su vez, Gil Unday (2005) evaluó los efectos ambientales que produce la generación de energía a partir de bagazo en el central Melanio Hernández y utilizó el software DECADES para obtener factores de emisión.

Más tarde, Kawashima et al. (2015) presentaron el inventario de emisiones sobre la base de las plantas de energía que queman bagazo de la caña de azúcar y aclararon que es uno de los combustibles utilizados con mayor frecuencia para generar electricidad en Brasil, cuyo uso ha aumentado paulatinamente para satisfacer la demanda de energía. En un trabajo reciente, Hernández-Garces et al. (2016) y Hernández et al. (2017) estimaron las emisiones provenientes de los centrales azucareros de la provincia de Mayabeque y Ciego de Ávila al utilizar factores de

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

emisión. Mientras, otros investigadores han calculado las emisiones con un enfoque climático (Reinosa et al., 2017).

Luego de la discusión anterior, este artículo se propone como objetivo: estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y MP) emitidos por las calderas de centrales azucareros espirituanos como antecedente para la futura evaluación de las emisiones de las bioeléctricas.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Como estudio precedente para la evaluación de las futuras bioeléctricas fueron elegidos los generadores de vapor de los centrales de la provincia Sancti Spíritus por ser la que cuenta con uno de los centrales más grandes del país: el Uruguay. Se emplearon, como métodos teóricos, el hipotético-deductivo y la modelación para poder cumplir los objetivos propuestos.

A partir de la ecuación (1), recomendada por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA, 1998), se estimaron las emisiones de los contaminantes atmosféricos, y se emplearon los factores de emisión publicados por esta agencia en la serie AP 42 para fuentes puntuales o estacionarias (EPA, 1993).

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

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 ε=0.

Los factores de emisión considerados en el estudio se muestran en las Tablas 1 y 2. La EPA (1993) subestima al SO<sub>2</sub>, no obstante se considera en el presente estudio debido a la importancia de este contaminante criterio. Se toma entonces el factor de emisión reportado por NPI (2001) para el SO<sub>2</sub>.

**Tabla 1:** Factores de emisión

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7,8
NO <sub>x</sub>	0,6

**Fuente:** EPA (1993)

**Tabla 2:** Factores de emisión

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

**Fuente:** NPI (2001)

La Tabla 3 muestra la composición elemental del combustible que alimenta a los generadores de vapor. Diversos autores reportan una composición semejante para el bagazo con una baja composición de azufre o no lo reportan debido a que las emisiones de SO<sub>2</sub> provenientes de la quema de bagazo son escasas (EPA, 1993).

**Tabla 3:** Composición elemental del bagazo.

Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre
19,2 %	2,6 %	0,15	<0,1 %
42,2	5,47	0,23	0,0
44,6	5,8	0,6	0,1

**Fuente:** EPA (1993), Manals-Cutiño et al. (2015), Hassuani et al. (2005)

A partir de la norma potencial de caña molida por el central (Tabla 4) y considerando que la misma proporcionaba un 27% de bagazo, se estimó la cantidad de bagazo quemado.

**Tabla 4:** Consumo de caña de los centrales

Central/Municipio	# de chimeneas	# de calderas	Consumo de caña (t/h)
Melanio Hernández/Taguasco	2	3	192
Uruguay/Jatibonico	2	5	300

**Fuente:** Elaboración propia

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

A continuación se sustrajo un 8%, cantidad destinada a la casa de bagazo, almacenada para un futuro arranque de la caldera (Tabla 5).

**Tabla 5:** Consumo de caña de los generadores de vapor

Central	Consumo de bagazo (t/h)	Temperatura salida gases de combustión (K)
Melanio Hernández	48	448,15
Uruguay	75	488,15

**Fuente:** Elaboración propia

La temperatura de salida de los gases de combustión se promedió ya que ambos centrales poseen más de una emitiendo a través de la misma chimenea.

El consumo combustible, convenientemente transformado en kg/s, se determinó a partir de la masa de combustible gastado calculada anteriormente. Mientras, 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 ( $m^3/s$ ),

$V$  es el volumen de gases húmedos ( $m^3/kg$ ), para condiciones normales ( $0^\circ C$  y  $760$  mmHg), y,

$C$  es el consumo de combustible en kg/s.

El volumen de gases  $V$  se determinó según la ecuación (3):

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

donde  $P_C$ ,  $P_H$ ,  $P_S$  y  $P_O$  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 emitidas por los generadores de vapor objeto de estudio se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Emisiones y flujos volumétricos

Central	Emisiones (g/s)			Flujo de gases (m <sup>3</sup> /s)
	MP	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	
Melanio Hernández chimenea 1	34,4	2,6	1,1	10,2
Melanio Hernández chimenea 2	68,8	5,3	2,2	40,9
Uruguay chimenea 1	96,9	7,5	3,1	94,2
Uruguay chimenea 2	64,6	5,0	2,1	42,6

**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados conseguidos de caudal y emisión son inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos pero son varios órdenes superiores que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible y que están instalados en distintas industrias e instituciones de la región (Cuesta et al., 2016). Se destacan los valores para ambas chimeneas del Uruguay debido a los altos valores de consumo de bagazo.

Los generadores de vapor objeto de estudio de este trabajo se clasifican como c-1 (Calderas de vapor. Biomasa) según la norma NC/TS 803: 2010 que establece las Emisiones Máximas Admisibles (EMA), las cuales se han establecido en dependencia de las características de las instalaciones. Esta norma solo aplica a los contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y material particulado.

Se convirtieron los valores de concentración de los contaminantes a unidades de mg/Nm<sup>3</sup> con el fin de realizar la comparación de las emisiones con la norma cubana.

En la Tabla 7 se observa que todas las chimeneas superan los límites establecidos para el MP y los NO<sub>x</sub>. La mayor contribución, lógicamente es el MP, causada esencialmente por el empleo de bagazo como combustible. Por otra parte, ninguna de las emisiones resultantes de SO<sub>2</sub> sobrepasa las EMAs establecidas en la norma cubana debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado.

Los resultados para el Melanio Hernández contradicen los de Gil Unday (2005) quien empleó otros factores de emisión. Se evidencia la necesidad de validar estos resultados determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

**Tabla 7:** Comparación normativa de las emisiones

Central	Emisiones (mg/Nm <sup>3</sup> )		
	MP	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
EMA Fuentes existentes	400	100	1000
Melanio Hernández chimenea 1	5516,6	424,4	176,8
Melanio Hernández chimenea 2	2759,3	212,3	88,4
Uruguay chimenea 1	1839,5	141,5	59,0
Uruguay chimenea 2	2711,8	208,6	86,9

**Fuente:** Elaboración propia

La dispersión es un proceso de dilución que mezcla el aire ambiente con el penacho de partículas gobernado principalmente por la turbulencia atmosférica (López, 2006). Esta puede ser creada por el aire fluyendo alrededor de obstáculos e irregularidades de la superficie por ejemplo 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.

Producto de la dispersión, las emisiones objeto de estudio deben influir fundamentalmente en las zonas rurales en las que se supone un uso agrícola del suelo. Ellas no deben afectar a las comunidades vecinas a los centrales teniendo en cuenta la altura de las chimeneas. La región de influencia y las consecuencias de las inmisiones de los contaminantes analizados pudiera estimarse a través de la modelación de la dispersión de estas emisiones (Hernández-Garces et al., 2015).

Torres et al. (2015) evaluaron como posible solución a la emisión de contaminantes la gasificación del bagazo para la generación de electricidad, de forma limpia y altamente eficiente. Mientras, Ren et al. (2017) consideraron el uso de la torrefacción del bagazo con la ulterior reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Cualquiera de estas dos alternativas deberá evaluarse como posible solución.

## CONCLUSIONES

La evaluación de los contaminantes atmosféricos emitidos por los generadores de vapor de centrales azucareros analizados, arrojó resultados de emisión de varios órdenes mayor que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos



## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

como combustible, pero inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos.

La verificación 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<sub>x</sub> de todas las chimeneas superan los máximos fijados; mientras que para el SO<sub>2</sub> ninguna de las emisiones sobrepasa el valor legal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cuesta, O., Sosa, C., Iraola, C., Menéndez, L., González, Y., Nuñez, V., Fonte, A., Imbert, C., Barcia, S., Gómez, Y., Portal, D., & Collazo, A. (2016). *Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas*. La Habana, Cuba: CITMA/AMA/Instituto de Meteorología. Resultado Científico, Resumen ejecutivo.

Dirección general de salud ambiental [DIGESA]. (2005). *Inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Trujillo, Perú*.

Domenech-López, F., Lorenzo-Acosta, Y., Lorenzo-Izquierdo, M., & Esquivel-Baró, L. (2011). 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*, 45(3), 30-37.

Environmental Protection Agency [EPA]. (1993). *Emission factor documentation for AP-42 section 1.8 Bagasse combustion in sugar mills*.

Environmental Protection Agency [EPA]. (1998). *Emissions Factors & AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*.

Gadi, R., Kulshrestha, U. C., Sarkar, A. K., Garg, S. C., & Parashar, D. C. (2003). Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from biofuels in India. *Tellus B*, 55(3), 787-795.

Gil Unday, Z. (2005). *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. Universidad de Girona.

González-Corzo, M. (2015). *La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes*. Bildner Center.

Hassuani, S. J., Lima, M. R., & Carvalho, I. (2005). *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC - Centro de Tecnología Canavieira. 1st edition.

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

Hernández-Garces, A., Jauregui Haza, U., Souto González, J., Casares Long, J., Saavedra Rodríguez, S., Guzmán Martínez, F., & Torres Valle, A. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista De Postgrado*, 3(2).

Hernández-Garces, A., Reinoso Valladares, M., Ordoñez, Y. C., Barcelona, L., & Hernández, F. (2016). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros. *Ecosolar*, 56, 1-7.

Hernández-Garces, A., Reinoso, M., & Hernández, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad & Ciencia*, 6(2), 17-26.

Kawashima, A. B., de Morais, M. V. B., Martins, L. D., Urbina, V., Rafee, S. A. A., Capucim, M. N., & Martins, J. A. (2015). Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3(6), 72-76.

López, C. (2006). *Introducción a la gestión de la calidad del aire. Modelación de la calidad del aire*. Instituto de Meteorología.

Manals-Cutiño, M., Penedo-Medina, M., & Salas-Tort, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química*, 35(2), 244-255.

National Pollutant Inventory [NPI]. (2001). *Emission estimation technique manual for Combustion in boilers, Version 3.6*.

NC/TS 803. (2010). *Calidad del aire - emisiones máximas admisibles. De contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor*. Oficina Nacional de Normalización.

Nova González, A. (2013). *Importancia económica y estratégica de la agroindustria de la caña de azúcar para la economía cubana*. Ponencia presentada en "Transforming The Cuban Economic Model." Bildner Center for Western Hemisphere Studies, The Graduate Center, CUNY, New York.

Reinoso, M., Hernández-Garces, A., Ordoñez, Y. C., & Hernández, F. (2017). Inventario de emisiones de dióxido de carbono procedentes de centrales azucareros de la provincia Mayabeque. *Ecosolar*, 57, 13-16.

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN ORIGINAL

Ren, X., Sun, R., Meng, X., Vorobiev, N., Schiemann, M., & Levendis, Y. A. (2017). Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*, 188, 310-323.

Shah, S. A., Soomar, M., & Hussain, A. (2016). Comparative Emission Analysis of Bituminous Coal, Sugarcane Bagasse and Rice Husk. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48(3).

Torres, A., Almazán, O., & Hernández, B. (2015). Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano. *Revista Centro Azúcar*, 42(1), 1-8.

**Recibido: 1/02/2017**

**Aceptado: 27/03/2017**