



Evaluación de la calidad del aire de la generación eléctrica de los grupos electrógenos en la provincia de Sancti Spíritus

Evaluation of the air quality from the electric generation of the generators in the province of Sancti Spíritus

Lic. Heydi Contreras Peraza[✉], Dr. Wenceslao Carrera Doral, MSc. Elieza Meneses Ruíz, Lic. Ileana López López

Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGIA

Resumen

Se presenta la evaluación de las afectaciones a la calidad del aire en la provincia de Sancti Spíritus, producto del funcionamiento de los grupos electrógenos en el año 2008. El objetivo es mejorar la información que actualmente se tiene de los inventarios nacionales de emisiones del sector energía y de controlar el comportamiento de la calidad del aire a escala local asociado al funcionamiento de los grupos electrógenos en la provincia de Sancti Spíritus. A partir de factores de emisión se obtuvo un inventario de emisiones de cada uno de los emplazamientos de la región. Se utilizaron los sistemas de información geográfico MapINFO v10.5 y ARGIS v10.2 para la obtención de mapas que visualizan la distribución espacial de las emisiones. Se empleó el sistema de modelaciones AERMOD con el fin de caracterizar la dispersión de los contaminantes. A partir de datos recopilados en campañas de mediciones fue posible analizar el comportamiento de las emisiones promedio anuales y las concentraciones incrementales generadas en los años 2008 y 2012-2015 por los grupos electrógenos de provincia. Se concluyó que las mayores emisiones de gases a la atmósfera se obtuvieron en el municipio de Sancti Spíritus. También se detectó que la mayor afectación a la calidad del aire se produjo en este municipio, donde los contaminantes NO_x, SO₂ y CO alcanzaron valores de 448.7 µg/m³, 593.13 µg/m³ y 22.72 µg/m³, respectivamente. En los períodos evaluados se visualizó una tendencia creciente al vertimiento de gases contaminantes al medio, producto de la pérdida de eficiencia en la generación por parte de los grupos electrógenos. Este estudio tiene una gran importancia

[✉] Autor para correspondencia: Heydi Contreras Peraza, CUBAENERGIA, calle 20 No. 4111 e/18ª y 47, Miramar, Playa, La Habana, Cuba. ☎: (+53) 7-206-2065. E-mail: heydi@cubaenergia.cu

Recibido: 22 de agosto de 2016

Aceptado: 24 de octubre de 2016

para el conocimiento del estado del medio ambiente atmosférico en la provincia de Sancti Spíritus.

Palabras clave: emisiones, evaluación de impactos, calidad del aire, Sancti Spíritus

Abstract

The evaluation of the effects on air quality in the province of Sancti Spíritus, produced by the operation of the generators in the year 2008, is presented in this work. The objective is to improve the information currently available on the national energy sector emissions inventories and to control the behavior of local air quality associated with the operation of the generators in Sancti Spiritus province. Based on emission factors, an emission inventory was obtained from each of the sites in the region. MapINFO v10.5 and ARGIS v10.2 geographic information systems were used to obtain maps that visualize the spatial distribution of emissions. The AERMOD modeling system was used in order to characterize the dispersion of contaminants. From the data collected in measurement campaigns it was possible to analyze the behavior of the average annual emissions and the incremental concentrations generated in the years 2008 and 2012-2015 by the provincial generators. It was concluded that the greatest emissions of gases to the atmosphere were obtained in the municipality of Sancti Spíritus. It was also detected that the most affected air quality occurred in this municipality, where NO_x, SO₂ and CO contaminants reached values of 448.7 µg/m³, 593.13 µg/m³ and 22.72 µg/m³, respectively. In the periods evaluated, an increasing tendency was observed for the discharge of pollutant gases into the medium, due to the loss of efficiency in the generation by the generating sets. This study has great importance for the state knowledge of the atmospheric environment in Sancti Spiritus province.

Key words: emissions, impact assessment, air quality, Sancti Spiritus

Introducción

Entre los problemas más importantes referentes al medio ambiente, a los que se enfrenta la humanidad en nuestros días, una buena parte tiene relación con la contaminación atmosférica. A escala global, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de partículas y gases potencialmente nocivos que afectan la salud humana y el ambiente y en el largo plazo dañan los recursos necesarios para el desarrollo sostenible del planeta.

Precisamente, el tema de la gestión de la calidad del aire se ha convertido en un aspecto al cual se le otorga una alta prioridad en todos los países del mundo, entre los que Cuba no constituye una excepción; comprobándose a través de diversos informes del CITMA ([CITMA, 2004](#), [2006](#), [2010](#)), que existen zonas donde esta problemática se evidencia con un carácter crítico y comprometido. Muchas han sido las investigaciones realizadas en nuestro país con el objetivo de monitorear el comportamiento de la

calidad del aire a escala local para salvaguardar no solo los bienes naturales y del estado, sino también la vida humana. Algunos de los trabajos llevados a cabo más recientemente en este tema son los realizados por [Cuesta *et al.*, \(2010\)](#); [Cuesta *et al.*, \(2014\)](#); [Turtós, \(2011\)](#); [Turtós, \(2012\)](#), en cada uno de estos trabajos se evidencia la necesidad de profundizar en temas que reflejen la incidencia del comportamiento de la actividad industrial en la calidad del aire de nuestro país, ya sea en asentamientos urbanos o en áreas rurales.

A finales del 2005 y principios del 2006 comenzó en Cuba la Revolución Energética, con el objetivo de apoyar al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) fue necesaria la introducción de grupos electrógenos en el país. La generación distribuida apoya las ya instaladas formas de generación de energía, sobre todo en casos de eventos extremos. Por otra parte, la introducción de esta tecnología trajo como desventaja una pérdida de la calidad de aire en muchas regiones del país, tal como fue el caso de la provincia de Sancti Spíritus. Como parte del trabajo realizado por el Grupo de Impacto Ambiental del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA) actualmente se dispone de una gran cantidad de información relacionada con las emisiones de gases producto de la combustión provenientes de: termoeléctricas, refinerías, grupos electrógenos (GE), entre otros. Sancti Spíritus es la única provincia

que actualmente dispone de un set de información que cumple con las condiciones para aplicar un estudio integral del comportamiento de la calidad del aire para un largo período de tiempo.

A partir esta investigación se obtuvo por primera vez, un inventario de emisiones desagregado producto de la generación eléctrica de los GE en la provincia de Sancti Spíritus. Dicho inventario fue empleado como dato de entrada al modelo AERMOD, lo que permitió realizar, también por vez primera, un diagnóstico integral de la calidad del aire en la provincia, a partir de datos recopilados en campañas de mediciones en los períodos año 2008 y 2012-2015.

Materiales y Métodos

Caracterización de la tecnología instalada en la zona de estudio

La generación total de la provincia reportada por la Oficina Nacional de Estadística e Información ([ONEI, 2009](#)) en el año 2008 fue de 196.6 GW/h y la capacidad instalada era 76, 4 MW.

En la [figura 1](#) se muestra la distribución espacial de los emplazamientos que fueron objeto de estudio de esta investigación. Cada uno de estos motores constituye una fuente de tipo puntual que incide de forma negativa en el medio en el cual se encuentran ubicadas, debido a que cada motor, emite a la atmósfera una gran cantidad de gases contaminantes (CO, NO, H₂S, SO₂) anualmente.

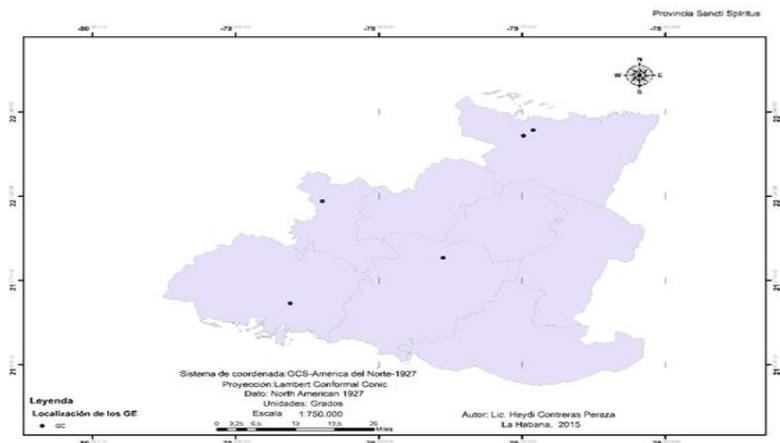


Figura 1. Distribución espacial de los grupos electrógenos en la provincia de Sancti Spíritus

Modelo básico simplificado para la estimación de las emisiones. Método de los factores de emisión

Un factor de emisión (FE) es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con la actividad que genera esa liberación (actividad que pueda ser fácilmente medida como la cantidad de material procesado o combustible utilizado). El uso de factores de emisión permite la ejecución de estimaciones en fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados de balances materiales.

Para esta investigación se consideró que el factor de emisión es del tipo no controlado, ya que en el caso nuestro las tecnologías no tienen control de emisión. Por lo tanto la [ecuación 1](#) queda de la siguiente manera:

$$E = A * FE \quad (1)$$

En la [tabla 1](#) se muestran los factores de emisión obtenidos por CUBAENERGIA ([Meneses, 2015](#)), y los mismos se presentan por tipo de contaminante y de acuerdo al tipo de combustible empleado en los grupos electrógenos para la generación.

Tabla 1. Factores de emisión por tipo de combustible

Contaminantes	Factores de emisión (kg/GWh)	
	Motores Fuel oil (MF)	Motores Diesel
CO	0.26	1.45
CO ₂	665.43	678.88
NO _x	6.24	3.97
SO ₂	8.57	2.26

Metodología empleada para la distribución espacial de las emisiones del sector energético obtenidas a partir de los factores de emisión

Con el objetivo de conformar el inventario desagregado para el sector eléctrico en la provincia de Sancti Spíritus fue necesario hacer uso de los Sistemas de Información Geográfico (SIG): MapINFO v10.5 y ARGIS v10.2.

En la [tabla 2](#) se muestran los criterios utilizados para la construcción de los mapas de emisiones haciendo uso de los SIGs.

Metodología empleada para la obtención de la dispersión de los contaminantes de estudio

Para resolver la dispersión local de contaminantes se utilizó el Sistema AERMOD (AERMAP-AERMET-AERMOD). Para el Sistema AERMOD se utilizaron las últimas versiones liberadas por la [EPA \(1995\)](#), y algunas herramientas de cálculo complementarias desarrolladas por [Turtós \(2012\)](#), haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones del país.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA), el 21 de octubre del 2005, estableció el AERMOD como el modelo de uso recomendado para la dispersión de contaminantes a escala local, en sustitución del ISCST3, que era el

usado hasta ese momento. Ha sido demostrado y documentado, tanto por evidencias científicas como por estudios de validación, que el AERMOD representa un sólido y significativo avance respecto al ISCST3. La formulación del AERMOD ha sido sometida a una revisión profunda e independiente, concluyéndose que las bases científicas del AERMOD están al nivel del estado del arte de la ciencia. Por otra parte, están disponibles en el sitio web <http://www.epa.gov./scram001/>, diecisiete Bases de Datos de resultados de mediciones en diferentes ambientes (terreno llano o complejo, áreas rurales y urbanas, con o sin obstáculos importantes en el terreno) que fueron usadas para evaluar los resultados del modelo y que pueden ser descargadas libremente para tareas propias de validación.

El sistema de modelos AERMOD, además del propio AERMOD, incluye dos pre-procesadores de datos de entrada que son componentes regulatorios del sistema: AERMET, pre-procesador de datos meteorológico y el AERMAP, pre-procesador de los datos del terreno. Se considera que a corto plazo se adicione el AERSURFACE, un pre-procesador de datos de uso del suelo. En el presente estudio el procesamiento de las capas de uso del suelo se realizó de forma cualitativa. Dividiendo el dominio en 12 sectores de 30°, se observa la proyección en el dominio cercano a la fuente.

Tabla 2. Características de los mapas de emisiones

Resolución del mapa	1:750 000
Sistema de coordenadas	GCS_América del Norte_1927
Proyección	Lambert Conformal Conic.
Tamaño de las celdas (km)	15 x 15

La descripción metodológica de los aspectos más importantes de la implementación realizada para el AERMOD aparece en [CUBAENERGIA, \(2010\)](#).

Dominio local de modelación

El dominio de modelación es un cuadrado de 40 x 40 km: 20 km al Norte, 20 km al Este, 20 km al Sur y 20 km al Oeste del punto considerado origen (punto central de cada emplazamiento de estudio), en el cual se definieron dos rejillas de receptores, una con puntos distanciados a 1 km en un área de 39 km por 39 km y una segunda rejilla con puntos distanciados a 250 metros en un área de 6000 metros por 6000 metros.

Datos meteorológicos para la dispersión local

Los datos meteorológicos primarios empleados fueron las observaciones reales tri-horarias registradas durante el período de modelación registradas por las estaciones meteorológicas de la provincia: Trinidad, El Jíbaro, Topes de Collantes y

Sancti Spíritus, que por sus situaciones geográficas son las más próximas a los emplazamientos. Para obtener los datos horarios, se realizó una interpolación lineal vectorial y escalar según la variable en cuestión.

Como para Cuba no se dispone de datos de sondeo o de aire superior, se desarrolló en CUBAENERGÍA una versión del AERMET que no exige dichos datos y simula el comportamiento vertical de la atmósfera a partir de los datos de superficie (específicamente la altura de la capa de mezcla convectiva, y a partir de ésta, la velocidad de escala y el gradiente de temperatura potencial por encima de la capa de mezcla).

Análisis de la calidad del aire

El análisis de la calidad del aire se realiza a partir de la obtención de las concentraciones (CO, NO_x y SO₂) mediante los modelos de dispersión aplicados a cada uno de los emplazamientos, teniendo en cuenta los valores de referencia (Cma) establecidos en la Norma Cubana [NC 1020: 2014](#) y que se muestran en la [tabla 3](#).

Tabla 3. Períodos de modelación y valores de referencia de las concentraciones de los contaminantes SO₂, NO_x y CO según lo establecido por [NC 1020: 2014](#)

	Períodos	Valor (µg/m ³)	Referencia
SO ₂	1 hora	250 (p95) ¹	NC 1020: 2014
	24 horas	45 (p98) ²	NC 1020: 2014
NO _x	1 hora	160 (p95)	NC 1020: 2014
	24 horas	40 (p98) ²	NC 1020: 2014
CO	1 hora	25 000	NC 1020: 2014

¹ El 95% de las determinaciones de este año no deben superar este valor

² El 98% de las determinaciones de este año no deben superar este valor

Resultados y Discusión

Análisis de las emisiones de gases obtenidas a partir de los factores de emisión

Las [tabla 4](#) se muestran de las emisiones de los contaminantes de estudio por cada emplazamiento de la provincia de Sancti Spíritus.

Como se puede apreciar, el contaminante más emitido por los GE es el CO₂, cuyos valores oscilan desde los 1 279.2 ton/año hasta los 49 602.4 ton/año, donde el mayor valor corresponde al emplazamiento de MF Sancti Spíritus. El segundo contaminante más emitido por los GE es el SO₂, cuyos valores oscilan desde los 4.3 ton/año hasta los 638.9 ton/año, donde el mayor valor corresponde al emplazamiento de MF Sancti Spíritus. El tercer contaminante más emitido por los GE es el NO_x, cuyos valores oscilan desde los 7.5 ton/año hasta los 465.2 ton/año, donde el mayor valor corresponde al emplazamiento de MF Sancti Spíritus. El contaminante menos emitido por los GE es el CO, cuyos valores oscilan desde los 2.7 ton/año hasta los 33.0 ton/año, donde el mayor valor corresponde al emplazamiento de Yaguajay.

En sentido general, las emisiones correspondientes al CO₂ representan el

98% sobre el total de contaminantes emitido por los grupos electrógenos de la provincia. En los casos del CO, NO_x y SO₂ estos aportes representan el 0.001%, 0.007% y el 0.008% respectivamente.

En la [figura 2](#) se representa la distribución espacial de cada uno de los contaminantes, graficados con la ayuda de los software MapINFO v10.5 y ARGIS v10.2.

En las figuras anteriores se puede apreciar que el área más afectada por el impacto de las emisiones provenientes de los grupos electrógenos es el municipio Sancti Spíritus.

Análisis del comportamiento de las emisiones promedios anuales en los años 2008 y 2015

Desde el 2012 y hasta el presente año, como parte de las funciones que realiza el Grupo de Impacto Ambiental, perteneciente al Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA), están las realizaciones de campañas de medición de emisiones de gases de la combustión, los cuales son vertidos a la atmósfera por cada uno de los emplazamientos de Grupos Electrógenos ubicados en la provincia de Sancti Spíritus. Gracias a dichas campañas actualmente se poseen datos que permiten analizar el

Tabla 4. Emisiones por fuentes en Sancti Spíritus

Contaminantes	Simón Bolívar (ton)	Yaguajay (ton)	Trinidad (ton)	Fomento (ton)	MF Sancti Spíritus (ton)
CO	2.7	31.5	33.0	6.9	19.2
CO ₂	1279.2	14805.7	15485.0	3405.1	49602.4
NO _x	7.5	86.5	90.5	22.9	465.2
SO ₂	4.3	49.4	51.6	7.3	638.9

comportamiento de la tendencia de las emisiones desde el año de referencia 2008 hasta la última campaña que reporta el comportamiento de dichas emisiones de la primera mitad del 2015.

946.6 ton, NO_x 5.1 ton y SO₂ 3.2 ton. En el emplazamiento Yaguajay las emisiones desde el año 2008 hasta el 2015 se incrementaron en: CO 29.0 ton, CO₂ 13 045.1 ton, NO_x 66.0 ton y SO₂ 40.5 ton.

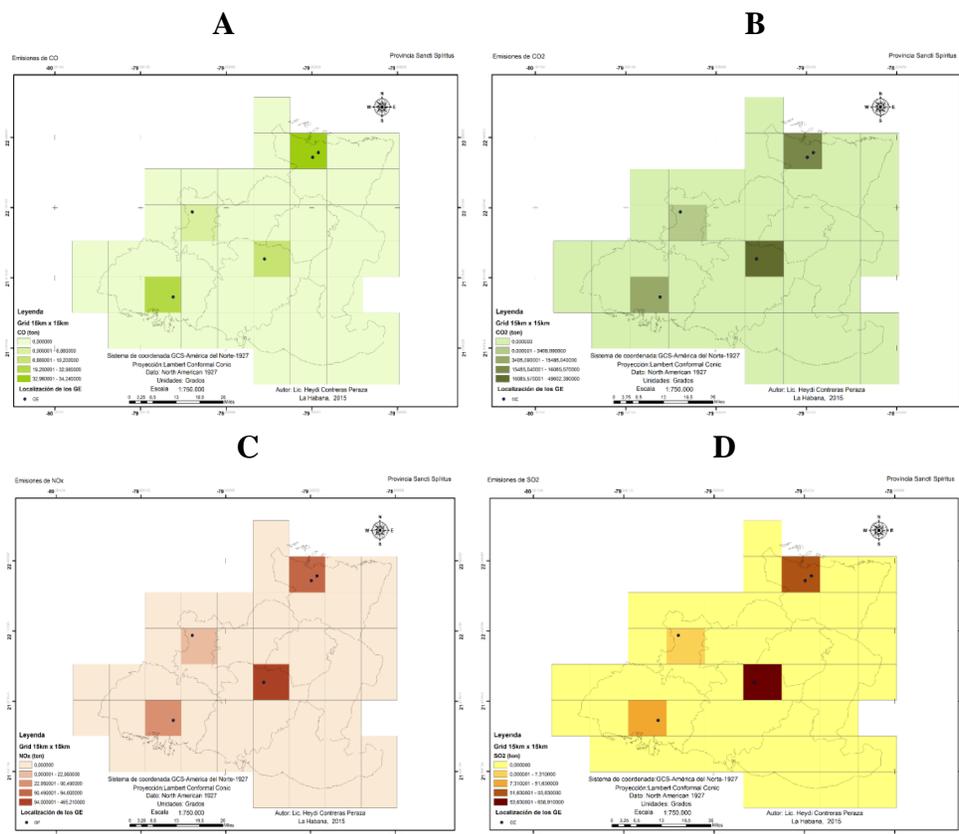


Figura 2. A-Emissiones de CO (ton/año), B-Emissiones de CO₂ (ton/año), C-Emissiones de NO_x (ton/año), D-Emissiones de SO₂ (ton/año)

En la [figura 3](#) se muestra el comportamiento de las emisiones de los distintos contaminantes del año de referencia (2008) con respecto la última campaña realizada que reporta el comportamiento de las emisiones de la primera mitad del 2015 en la provincia.

Como resultados se obtuvo que el emplazamiento Simón Bolívar las emisiones desde el año 2008 hasta el 2015 se incrementaron en: CO 2.0 ton, CO₂

En el emplazamiento Trinidad las emisiones desde el año 2008 hasta el 2015 se incrementaron en: CO 323.2 ton, CO₂ 11 979.0 ton, NO_x 333.4 ton y SO₂ 40.2 ton. En el emplazamiento Fomento las emisiones desde el año 2008 hasta el 2015 se incrementaron en: CO 5.4 ton, CO₂ 2 800.7 ton, NO_x 16.7 ton y SO₂ 5.0 ton. En el emplazamiento de MF Sancti Spíritus 110 kv las emisiones desde el año 2008 hasta el 2015 se incrementaron en: CO 3.1

ton, CO₂ 21 157.6 ton, NO_x 59.7 ton y SO₂ 67.5 ton.

El aumento de las emisiones se debe a que desde el año 2008 hasta la primera mitad del 2015 se pudo apreciar el aumento del consumo específico en cada una de las instalaciones de la provincia. La generación del 2008 fue de 216.8 GW/h, en el 2012 fue de 217.3 GW/h y en el 2013

fue de 218.3. Por lo tanto, si cada una de las instalaciones necesita cada año consumir una mayor cantidad de combustible para poder generar la misma cantidad de energía, esto evidencia la pérdida de la eficiencia de los grupos electrógenos con forme transcurren los años.

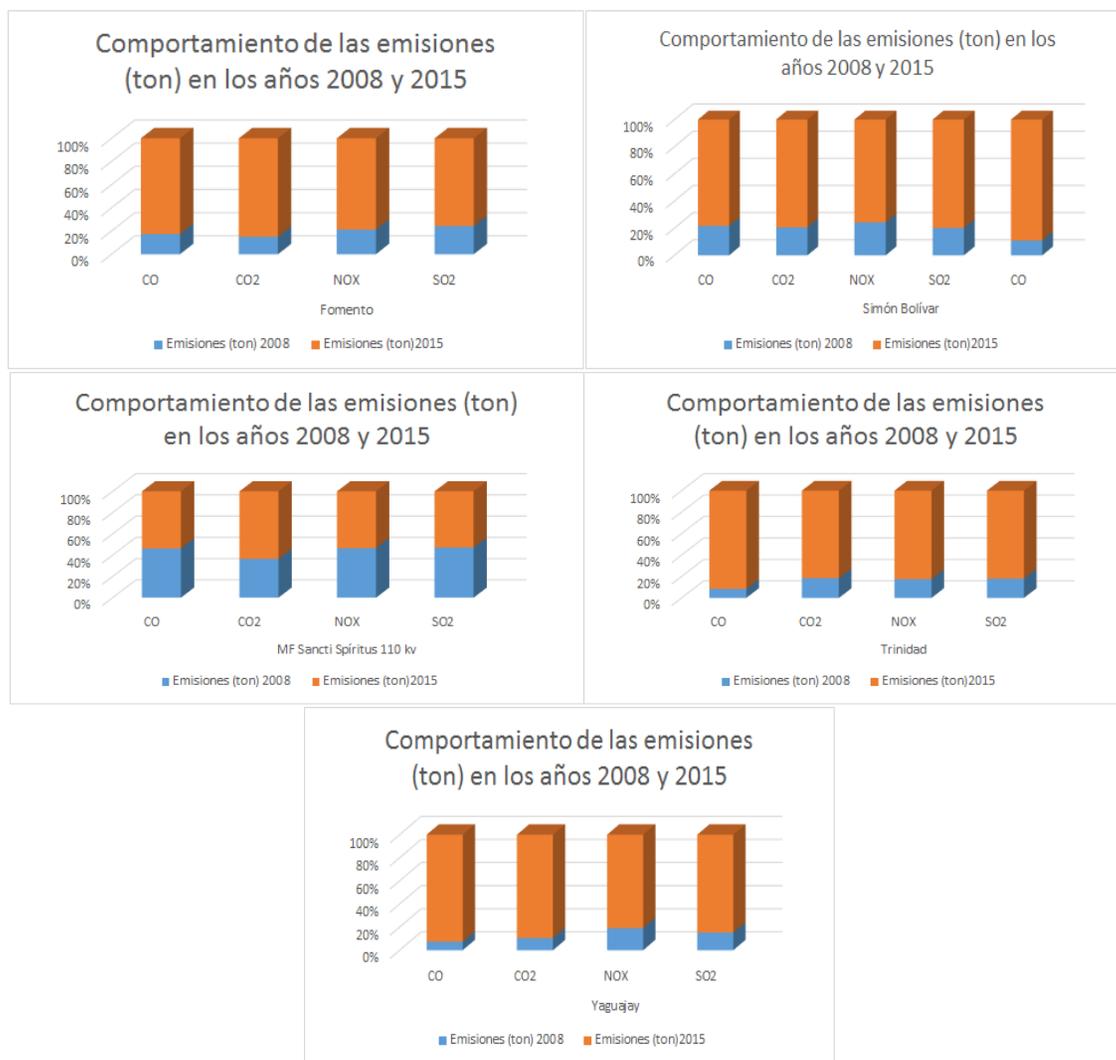


Figura 3. Comportamiento de las emisiones de CO, CO₂, NO_x y SO₂ en los años 2008 y 2015 en Fomento, Simón Bolívar, Sancti Spíritus 110 kv, Trinidad y Yaguajay

Análisis de la calidad del aire en las áreas de estudio

A partir de la modelación con el sistema AERMOD se obtuvo las concentraciones máximas en los períodos de 1 año, 24 horas y 1 hora para cada uno de los contaminantes de estudio.

En el emplazamiento de Fomento, en la [figura 4](#), se observa que las afectaciones más importantes a la calidad del aire se deben al contaminante NO_x y específicamente para el período de 1 hora. Para el propio NO_x , en los períodos de 24 horas y 1 año, así como para los contaminantes CO y SO_2 , en todos los períodos analizados, no se incumple los valores normados referidos en la [NC 1020: 2014](#) de calidad de aire en inmisiones.



Figura 4. Isocintas de las concentraciones máximas de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de Fomento

En el emplazamiento de Trinidad, en la [figura 5](#), se observa que las afectaciones más importantes se deben al contaminante NO_x y específicamente para el período de 1 hora. Para el propio NO_x , en los períodos

de 24 horas y 1 año, así como para los contaminantes CO y SO_2 , en todos los períodos analizados, no se incumple los valores normados referidos en la [NC 1020: 2014](#) de calidad de aire en inmisiones.



Figura 5. Isocintas de las concentraciones máximas de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de Trinidad

En el emplazamiento de Yaguajay, en la [figura 6](#), se observa que las afectaciones más importantes se deben al contaminante NO_x y específicamente para el período de 1 hora, donde se viola el valor normado. Para el propio NO_x , en los períodos de 24 horas y promedio (1 año), así como para los contaminantes CO y SO_2 , en todos los períodos analizados, no se incumple los valores normados referidos en la [NC 1020: 2014](#) de calidad de aire en inmisiones.

En el emplazamiento de Sancti Spíritus 110 kv, en la [figura 7](#) y [8](#), se observan que las afectaciones más importantes se deben al contaminante NO_x y SO_2 para los períodos de 1 hora y 24 horas, donde se viola la norma. Para el CO en los tres períodos de evaluación, así como para

estos dos contaminantes en el período de 1 año, no se incumple los valores normados referidos en la [NC 1020: 2014](#) de calidad de aire en inmisiones.

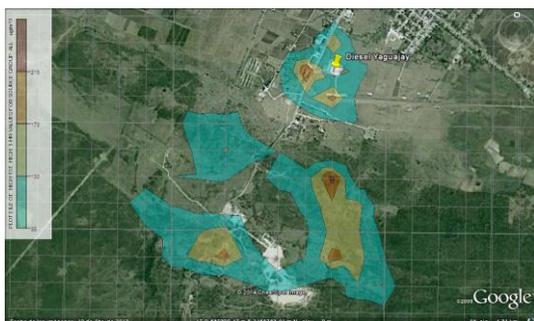


Figura 6. Isolíneas de las concentraciones máximas de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de Yaguajay

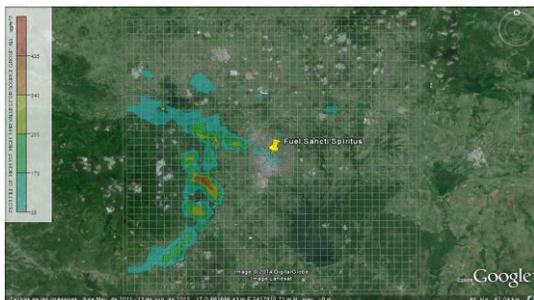


Figura 7. Isolíneas de las concentraciones máximas de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de MF Sancti Spiritus

En el emplazamiento de Simón Bolívar, en la [figura 9](#), se observa que las afectaciones más importantes se deben al contaminante NO_x y específicamente para

el período de 1 hora, donde se viola el valor normado. Para el propio NO_x, en los periodos de 24 horas y promedio (1 año), así como para los contaminantes CO y SO₂, en todos los periodos analizados, no se incumple los valores normados referidos en la [NC 1020: 2014](#) de calidad de aire en inmisiones.



Figura 8. Isolíneas de las concentraciones máximas de SO₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de MF Sancti Spiritus 100 kv



Figura 9. Isolíneas de las concentraciones máximas de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en el período de 1 hora correspondiente al emplazamiento de Simón Bolívar

Análisis del comportamiento de las concentraciones promedios anuales en los años 2008, 2012-2015

En sentido general, se obtuvo que la tendencia de las concentraciones de NO_x evaluadas en los períodos 2008, 2012 y la primera mitad del 2015 es ascendente en los tres intervalos (1 hora, 24 horas y 1 año). En el caso del período de 1 hora las concentraciones se incrementaron en 375.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta la primera mitad del 2015. En el caso del período de 24 horas las concentraciones se incrementaron en 44.62 desde el 2008 hasta 2015. En el caso del período de 1 año las concentraciones se incrementaron en 23.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta la primera mitad del 2015. Las concentraciones de los contaminantes no sobrepasaron los valores umbrales normados por la [NC 1020: 2014](#) en los períodos de 24 horas y 1 año, no siendo así en el período de 1 hora para los que si se sobrepasaron los valores umbrales en los períodos evaluados.

De igual forma la tendencia de las concentraciones de SO₂ evaluadas en los períodos 2008, 2012 y la primera mitad del 2015 es ascendente en los tres intervalos (1 hora, 24 horas y 1 año). En el caso del período de 1 hora las concentraciones se incrementaron en 141.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta 2015. En el caso del período de

24 horas las concentraciones se incrementaron en 67.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta 2015. En el caso del período de 1 año las concentraciones se incrementaron en 5.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta la primera mitad del 2015. Las concentraciones de los contaminantes no sobrepasaron los valores umbrales normados por la [NC 1020: 2014](#) en los períodos de 24 horas y 1 año, no siendo así en el período de 1 hora para los que si se sobrepasaron los valores umbrales en los períodos evaluados.

En el caso del CO, se constató que la tendencia de las concentraciones evaluadas en los períodos 2008, 2012 y la primera mitad del 2015 es ascendente en los tres intervalos (1 hora y 24 horas). En el caso del período de 1 hora las concentraciones se incrementaron en 1.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta 2015. En el caso del período de 24 horas las concentraciones se incrementaron en 42.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el 2008 hasta la primera mitad del 2015. Las concentraciones de los contaminantes no sobrepasaron los valores umbrales normados por la [NC 1020: 2014](#) en los períodos de 24 horas y 1 año, no siendo así en el período de 1 hora para los que si se sobrepasaron los valores umbrales en los períodos evaluados. En las [figuras 10, 11 y 12](#) se muestran los comportamientos antes descritos.

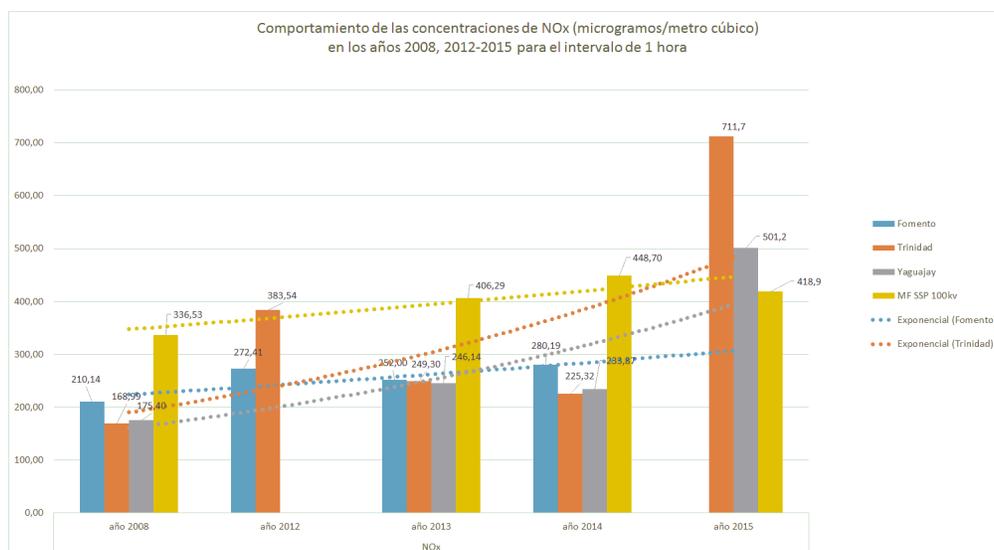


Figura 10. Comportamiento de las concentraciones de NO_x en el período de 1 hora correspondiente al 2008, 2014 y 2015

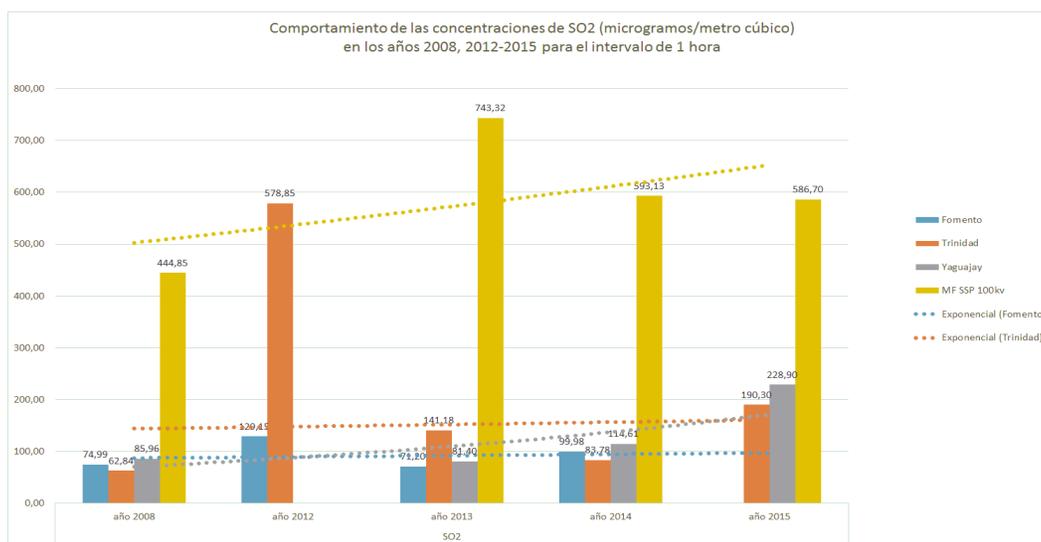


Figura 11. Comportamiento de las concentraciones de SO₂ en el período de 1 hora correspondiente al 2008, 2014 y 2015

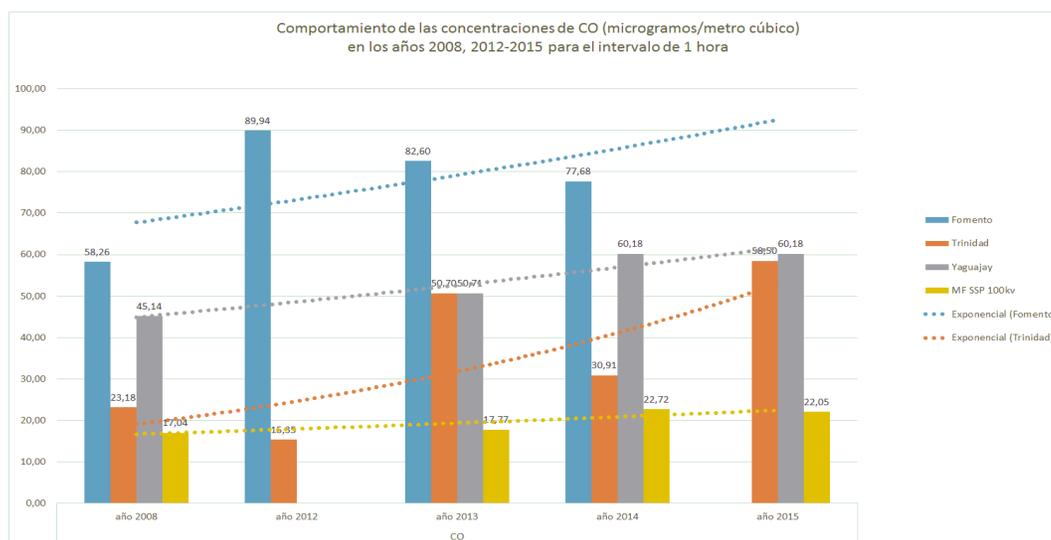


Figura 12. Comportamiento de las concentraciones de CO en el período de 1 hora correspondiente al 2008, 2014 y 2015

Conclusiones

- A partir de aplicar el método de los factores de emisión fue posible obtener el inventario de emisiones para cada uno de los GE instalados en la provincia de Sancti Spíritus. La mayor afectación por efecto de las emisiones se encontró en el municipio de Sancti Spíritus, donde los contaminantes: CO, CO₂, NO_x y SO₂ alcanzaron valores de 19.2 ton, 49 602.4 ton, 465.2 ton y 638.9 ton, respectivamente
- A partir del empleo del software AERMOD se pudo realizar una evaluación integral de calidad del aire en las regiones cercanas a los emplazamientos de los GE en la provincia de Sancti Spíritus. La mayor afectación de la calidad del aire se encontró en el municipio de Sancti

Spíritus, donde los contaminantes: NO_x, SO₂ y CO alcanzaron valores de 448.7 µg/m³, 593.13 µg/m³ y 22.72 µg/m³, respectivamente; los cuales no sobrepasaron los valores umbrales referidos en la [NC 1020: 2014](#).

- En sentido general puede decirse que, pese a que en algunas localidades de la provincia no se vieron superados los valores umbrales establecidos por la norma, aun así a través de este estudio pudo evidenciarse un deterioro de la calidad del aire en cada uno de los territorio de estudio.

Referencias

- CITMA 2004. *Situación Ambiental Cubana 2003*. Cuba: Agencia de Medio Ambiente.
- CITMA 2006. *Situación Ambiental de Sancti Spíritus*. Cuba.

- CITMA 2010. *Estrategia Ambiental de Sancti Spiritus 2007-2010*. Cuba.
- CUBAENERGIA 2010. *Calidad del aire. Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas*.
- Cuesta, O.; Wallo, A.; Montes de Oca, L.; Pierra, A. & Tricio, V. 2010. "Calidad del aire en zonas urbanas de Cuba". In: *XI Congreso de Medio Ambiente*, España: CONAMA, Available: <<http://www.conama10.es/web/index.php>>.
- Cuesta, S. O.; Collazo, A. A.; González, J. Y.; Fonseca, H. M.; Fernández, A. C.; Rodríguez, Y.; García, V. E.; Carrillo, V. E.; Sosa, P. C.; Manrique, S. R.; Sánchez, N. P.; Manso, J. R.; Batule, Á. L.; López, L. R.; Expósito, L. P. J.; García, G. M.; Alonso, S. A. & Menéndez, R. L. 2014. *Caracterización de la dispersión de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos emitidos por las principales fuentes fijas y su impacto potencial en La Habana*. La Habana: CITMA-AMA-Instituto de Meteorología, 188 p.
- EPA 1995. *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models*. no. EPA-454/B-95-003b, Office of Air Quality Planning and Standards, Vol. 2, Description of model algorithms.
- Meneses 2015. "Factores de emisión para el sector eléctrico". In: *X Convención Internacional sobre Medioambiente y Desarrollo*, ISBN: 978-959-300-073-4.
- Oficina Nacional de Normalización 2014. *Calidad del aire-contaminantes-concentraciones máximas admisibles (CMA) y valores guías en zonas habitables*. no. NC 1020.
- ONEI 2009. *Producción y Consumo de Electricidad Diciembre 2008*. Dirección de Industrias ONEI.
- Turtós 2011. *Evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en Cuba usando el modelo fotoquímico CHIMERE*. .
- Turtós, L. 2012. *Implementación de modelos refinados de dispersión local de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes estacionarias*. Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba: Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía.