

Inventario de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas de la ciudad de Cienfuegos



Atmospheric emissions inventory from main fixed source of Cienfuegos city

<http://opn.to/a/LRird>

Antonio Frías-López ^{1*}, Sinaí Barcia-Sardiñas ¹

¹Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba

RESUMEN: La determinación cuantitativa de las emisiones de contaminantes atmosféricos por las fuentes fijas en las ciudades y sus efectos potenciales en el medio ambiente, constituye un estudio necesario y urgente en un mundo cada vez más urbanizado. En el presente trabajo se realiza el inventario de emisiones de las fuentes fijas de contaminación atmosférica de la ciudad de Cienfuegos. Se utilizan las metodologías correspondientes a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), el proyecto europeo CORINAIR la y el programa europeo de Monitoreo y Evaluación (EMEP), además de la aplicación de la guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos de fuentes puntuales industriales, recogida en la Norma Cubana NO: 1049/2014. Se presenta la modelación de la dispersión del SO₂ y NO₂ en la ciudad de Cienfuegos y para ello se utiliza el software AERMOD. Los resultados muestran la emisión a la atmósfera de más de 43 mil toneladas de SO₂; mientras que para el NO₂ se emiten alrededor 4 mil toneladas al año. Las mayores emisiones en la ciudad provienen de la Refinería de Petróleo, la Termoeléctrica y el Grupo Electrógeno Principal (GEP) ubicado dentro del área urbana. Las zonas de la ciudad más perjudicadas en cuanto a recepción de contaminantes están ubicadas alrededor del GEP donde se sobrepasan las Concentraciones Máximas Admisibles a resolución anual. Los resultados obtenidos constituyen una valiosa herramienta para la gestión ambiental de la ciudad.

Palabras Clave: inventario de emisiones, fuentes contaminantes, dispersión de contaminantes, Cienfuegos.

ABSTRACT: The quantitative determination of emissions of air pollutants by fixed sources in cities and their potential effects on the environment is a necessary and urgent study in an increasingly urbanized world. In the present work, the emissions inventory of the fixed sources of atmospheric pollution of the city of Cienfuegos is carried out. The methodologies corresponding to United States Environmental Protection Agency (USEPA), European project CORINAIR and the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) are used, in addition to the application of the technological data guide for the inventory of emissions of atmospheric pollutants from industrial point sources, collected in Cuban Standard NO: 1049/2014. The modeling of SO₂ and NO₂ dispersion in the city of Cienfuegos is presented using the AERMOD software. The results show the emission to the atmosphere of more than 43 thousand tons of SO₂; while for NO₂ around 4 thousand tons are emitted per year. The largest emissions in the city come from the Oil Refinery, the Thermolectric and the Main Generating Group (GEP) located within the urban area. The areas of the city most affected in terms of reception of pollutants are located around the GEP where the Maximum Acceptable Concentrations are exceeded at annual resolution. The results obtained constitute a valuable tool for the environmental management of the city.

Key words: emissions inventory, polluting sources, pollutants dispersion, Cienfuegos.

*Autor para correspondencia: Antonio Frías-López. E-mail: frias@cfg.insmet.cu

Recibido: 01/02/2019

Aceptado: 15/04/2019

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran preocupación por el estado de la calidad del aire, lo que ha conllevado a la realización de múltiples estudios para conocer los mecanismos que intervienen en tan complejo proceso. Para conocer las características de los principales contaminantes atmosféricos que influyen a nivel global, regional y local sobre el medio ambiente atmosférico se requiere del conocimiento de las emisiones, de su distribución a través del monitoreo y de la utilización de modelos de dispersión, para conocer tanto las concentraciones como las deposiciones de estos contaminantes.

Cuba cuenta con pocos recursos para asumir un monitoreo adecuado que permita cuantificar y conocer a fondo las emisiones y las concentraciones para determinar con exactitud la presión a que está sometido el medio ambiente y los efectos de estos gases y material particulado en la atmósfera (Cuesta *et al.*, 2010). No obstante, a través de la compilación de la información existente, se puede ilustrar parte de la situación tratando de significar las principales fuentes de contaminación conocidas.

Un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos consiste en determinar las cantidades de contaminantes que se incorporan al aire proveniente de todo tipo de fuente en cierto tiempo en un área determinada. Contar con un inventario actualizado es una buena herramienta para la gestión del medio ambiente atmosférico. En primer lugar, permite conocer la primera parte del ciclo de transmisión de contaminantes (las emisiones) con el fin de conocer las cantidades emitidas por las fuentes fijas o estacionarias, identificando así a los contaminantes primarios o principales. Además de cuantificar las emisiones, también se identificarán las fuentes y las instituciones responsables, con el fin de implementar medidas de control y establecer futuras estrategias de mitigación.

En materia de inventario de emisiones a nivel nacional se han desarrollado una gran cantidad de trabajos, los que fundamentalmente se han dirigido a conocer las emisiones de gases de efecto

invernadero, apareciendo reflejado en los trabajos de (López *et al.*, 2002, 2003, 2004 y 2005), más reciente se han desarrollado los trabajos de (Rodríguez *et al.*, 2009; Cuesta *et al.*, 2010; Núñez *et al.*, 2012 y Cuesta *et al.*, 2017), estando encaminados estos últimos a cuantificar las emisiones de fuentes puntuales industriales.

En el caso de la provincia Cienfuegos se conocen los trabajos de Usagawa *et al.*, 2007 que estudian la contaminación atmosférica y la calidad de vida en el entorno del central Antonio Sánchez, la Destilería de Alcoholes Finos y la Fábrica de Levadura ubicadas en la misma localidad del municipio Aguada de Pasajeros. Cruz *et al.*, 2015 proponen la implementación de un sistema de gestión para la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Cienfuegos como herramienta que permite una mejora en la gestión de la calidad del aire urbano en esa localidad. Para ello realizan un inventario de emisiones de fuentes fijas de la ciudad de Cienfuegos, monitorean las emisiones en algunas calderas de la ciudad y modelan las emisiones con el software Disper 2.0. Más recientemente Hernández *et al.* (2017), estudian las emisiones de contaminantes en los centrales azucareros de la provincia.

Los estudios de la contaminación atmosférica a nivel local están relacionados con los asentamientos urbanos o industriales y los efectos inmediatos de esta sobre la salud humana o los ecosistemas. Según reporte de la Organización de Naciones Unidas (ONU, 2014), para el 2050 el 66 % de la población mundial vivirá en ciudades. El crecimiento rápido y la concentración de la población en áreas urbanas están asociados con una mayor presencia de actividades industriales, incremento del parque vehicular y el elevado consumo de combustibles, que contribuyen a agudizar el problema de la contaminación atmosférica.

La ciudad de Cienfuegos clasifica entre las ciudades del país con un nivel de calidad del aire clasificado como pésimo (PNUMA, 2009 y Cuesta *et al.*, 2014).

Por todo lo anterior se plantea como objetivo principal: conocer cuantitativamente las emisiones

de contaminantes en la atmósfera provocada por las principales fuentes fijas en la ciudad de Cienfuegos tomando como año base el 2014.

En el estudio de la eficacia de los diversos medios de lucha contra la contaminación atmosférica, es importante conocer las relaciones que existen entre la emisión, transporte atmosférico y transformación de contaminantes. Y es aquí donde la modelación matemática de los procesos atmosféricos desempeña un papel importante al contribuir a cubrir el espacio que hay entre las observaciones de campo y la comprensión detallada de dichos fenómenos (Collazo, 2007). Es por ello que también se presenta la modelación de la dispersión del SO₂ y NO₂ en la ciudad de Cienfuegos que fueron los que presentaron las mayores emisiones en el año estudiado. Para ello se utiliza el software AERMOD, desarrollado por la empresa *Lakes Environmental Inc.* de Canadá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características físico- geográficas y socio-económica de la Ciudad de Cienfuegos

La Ciudad de Cienfuegos, es una ciudad costera desarrollada junto a la bahía de Jagua, también llamada bahía de Cienfuegos (su accidente

geográfico de mayor relevancia), que constituye uno de sus principales elementos distintivos, extendiéndose al norte y este de la misma. Se ubica en los 22° 08'46" de latitud norte y en los 80° 27'14" de longitud oeste, ocupando un área total de 4 400 Ha (44.00 km²). Tiene una altura promedio de 22.5 m (snmm) y una población de 147110 habitantes (ONEI, 2015).

El relieve en su generalidad es de llanura ondulada, medianamente disecionado y poco inclinado, aunque se encuentra severamente modificado como consecuencia de la transformación urbana. La costa es de terraza baja encontrándose algunas áreas pantanosas asociadas fundamentalmente a la desembocadura de ríos y arroyos.

El clima es tropical, estacionalmente húmedo con influencia marítima. La temperatura media anual es de 24.7 °C y la humedad relativa es del 76%. El mes de Enero es el más frío con una temperatura media de 21.6 °C y el mes de Julio es el más cálido con 27.0 °C. La precipitación media anual es de 1363.1 mm, con un período seco (noviembre-abril) y otro húmedo (mayo-octubre) (Barcia, 2012).

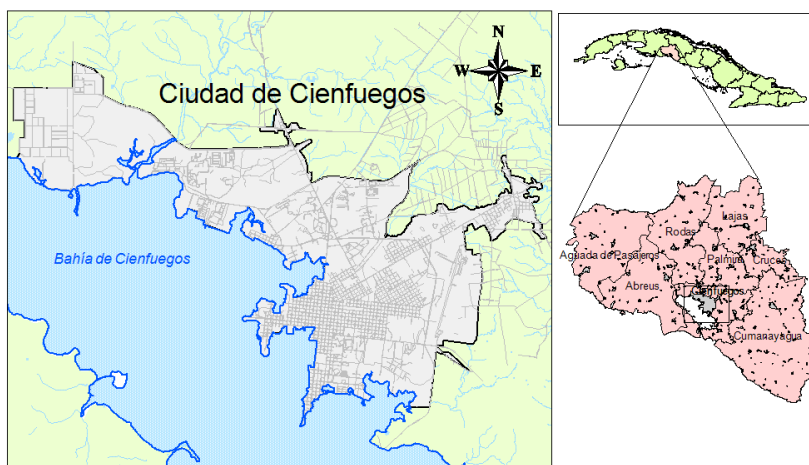


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Cienfuegos.

Los vientos predominantes todo el año en la ciudad de Cienfuegos son de región nordeste, pero desde el punto de vista local los sistemas de vientos locales (brisas de mar y tierra) adquieren una gran importancia en la ciudad, al estar situada en el centro sur de la isla de Cuba. Esta situación geográfica hace que haya un cambio notable en las direcciones predominantes del viento entre la noche y el día. Así, por ejemplo, el comportamiento promedio del viento durante la noche y primeras horas de la mañana tiene una componente principal de región nordeste, mientras que en el horario de mayor calentamiento se aprecia un cambio notable de la circulación del viento con direcciones predominantes de componente sur al suroeste.

La configuración propia de la bahía de Cienfuegos modifica también la dirección de la brisa en la ciudad, ya que por el día las aguas de la misma demoran más en calentarse que la tierra circundante y se crean microbrisas en toda la costa interior, algunas de las cuales se oponen al vector brisa marina propiamente dicho mientras otras se suman (Lecha, 1993).

La industria es clave en el desarrollo de la ciudad, la cual presenta 3 zonas industriales fundamentales. En la zona I predominan las ramas alimentarias, maquinaria no eléctrica, materiales de la construcción y el sector transporte. La característica fundamental de la zona II es su desarrollo portuario y la zona III se vincula fundamentalmente a las producciones químicas.

Metodología

Los principales contaminantes emitidos a la atmósfera son producto de las actividades generadoras de la energía, las industriales y otras actividades económicas del territorio. En el presente trabajo se estudiaron el Dióxido de Azufre (SO₂), al Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Monóxido de Carbono (CO) y el Material Particulado de 10 y 2,5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2,5}) y los Compuestos Orgánicos Volátiles diferentes del Metano (COVDM).

Existen variadas metodologías para realizar los inventarios de emisiones según sus propósitos y alcances. Con el fin de armonizar todas estas en los

países miembros de la Comunidad Europea, la Comisión de Comunidades Europeas desarrolló la metodología CORINAIR de la cual se toman las ideas fundamentales para el presente trabajo, [EMEP/CORINAIR \(2007\)](#). También la metodología explicada en el documento de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ([USEPA. Documento, AP-42, 1995a](#)) ha contribuido al desarrollo del presente inventario, el cual tomó como año base el 2014.

El presente estudio aplicó la guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos de fuentes puntuales industriales, recogida en la Norma Cubana NO: 1049/2014 ([ONN, 2014b](#)), la cual explica en detalle los parámetros tecnológicos necesarios.

Se visitaron todas las fuentes fijas de la ciudad con el fin de obtener los datos técnicos de cada una de ellas. Los mismos fueron brindados por el responsable de medio ambiente de dichas entidades, los energéticos o técnicos responsables de los procesos productivos o de operación de las calderas. A partir de los recorridos por las industrias se verificaron las principales fuentes de emisión con las que cuenta cada una de estas industrias.

Estos datos son fundamentales para efectuar un cálculo adecuado de dichas emisiones a la atmósfera.

En general se utilizan diversos métodos para calcular las emisiones:

- Balance de masa
- Factores de emisiones
- Cálculos ingenieriles
- Mediciones en la fuente

A pesar de sus limitaciones, el cálculo de las emisiones mediante los factores de emisión, a menudo, constituyen el mejor o el único método disponible para calcular las emisiones. En general, se considera apropiado utilizar factores de emisión cuando los materiales que se emplean se consumen o combinan químicamente en los procesos, o cuando se producen bajas pérdidas de material, por liberación a la atmósfera, en comparación con las

cantidades que se tratan en proceso ([DIGESA, 2005](#)).

A partir de la [ecuación 1](#), se estiman las emisiones por el método de factores de emisión.

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

donde:

E - es la emisión (g/s)

FE - es el factor de emisión (g/kg)

A es el nivel de intensidad de la actividad (consumo de combustibles, producción), en unidades de masa o volumen por tiempo

ER es la eficiencia global en la reducción de emisiones (%).

Los factores de emisión utilizados en este resultado se obtuvieron a través de las fuentes siguientes: Compilación de factores de emisión de contaminantes atmosféricos (*Emission Factor and Inventory Group*) AP-42 ([U.S. EPA, 1995a](#)) y del software Industrial Pollution Control (Control de Contaminación Industrial) (IPC, 1995) desarrollado por el Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Por otro lado, se utilizan valores de emisiones medidos en calderas, grupos electrógenos, [Tabla 1](#), y centrales termoeléctricas desarrollados por Cubaenergía y la Universidad Central de Las Villas ([Núñez et al., 2012](#); [Roig et al., 2016](#) y [Meneses et al., 2018](#)), los cuales son una importante contribución al conocimiento de las emisiones en Cuba y se han utilizado en la confección del presente inventario.

En este caso solo se tuvieron en cuenta los Grupos Electrónicos de Régimen Base (de ahora en lo adelante GEP) que son los que se utilizan de forma continua para la generación eléctrica distribuida.

En el caso de la generación eléctrica en termoeléctricas se utilizaron los valores determinados de FE propios de CO, NO_x y SO₂ para el fuel-oil que es el combustible empleado en la generación eléctrica en la Carlos Manuel de Céspedes, que se reportaron para ser utilizados en la realización de los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero procedentes de la generación de electricidad, estudios de mitigación y

Tabla 1. Factores de emisión para grupos electrógenos (para 4 motores)

Contaminante	Factor de emisión (g/kW-h)*		Referencia
	Fuel Oil	Diesel	
NO _x	42.59	17.0	CUJAE/CUBAENERGIA
SO ₂	22.43	16.0	CUJAE/CUBAENERGIA
PM ₁₀	0.42	0.25	AP42/CUBAENERGIA
PM _{2.5}	0.21	0.125	AP42/CUBAENERGIA
CO	2.07	1.44	CUJAE/CORINAIR
COVDM	0.183	0.180	CORINAIR

* Fuente: CUJAE: [González, \(2010\)](#); CUBAENERGIA: Fonseca et al., (2012); [AP-42 \(1998\)](#); CORINAIR

Tabla 2. Factores de emisión para las instalaciones de hornos y calderas.

Contaminante	Factor de emisión (kg/m ³)*		Referencia
	Fuel Oil	Diesel	
NO _x	5.63	3.44	AP-42
SO ₂	75.16	42.49	AP-42
PM ₁₀	2.42	0.28	AP-42
PM _{2.5}	1.82	0.19	AP-42
CO	0.60	0.60	AP-42
COVDM	0.042	0.049	AP-42

* Fuente: [AP-42 \(1998\)](#)

determinación de líneas bases, [Meneses et al., 2018](#).

Luego del cálculo de las emisiones se procedió a la modelación de la dispersión del SO₂ y NO₂ para la ciudad de Cienfuegos aplicando el software AERMOD. Este software es uno de los modelos recomendados por la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (EPA USA) para evaluaciones ambientales de proyectos.

El modelo AERMOD EPA USA consiste en determinar la distribución de contaminantes en una pluma de manera horizontal y vertical siguiendo un comportamiento de tipo normal denominado distribución de Gauss (U.S. EPA, 2004). Se incorporan algoritmos de dispersión para considerar las diferencias de cotas del terreno en el dominio (terreno complejo). Para su funcionamiento el modelo debe ser alimentado por tres fuentes de información: un archivo de entrada de flujos y datos de la(s) fuente(s), un archivo meteorológico y un archivo de topografía digital.

La información meteorológica considerada en el estudio, corresponde a la registrada por la estación meteorológica de Cienfuegos (78344), cuyas coordenadas en UTM WGS84 son 557289.46 Este y 2453979.16 Norte, a una altitud aproximada de 42 m para la base y de 10 m para el Anemómetro. La serie temporal de las condiciones atmosféricas consideradas abarcó el año 2014. Las variables meteorológicas utilizadas fueron: dirección y magnitud de la velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, precipitación y cobertura de nubes.

Para la modelación de dispersión de contaminación atmosférica se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) disponible de forma libre en internet y que forma parte del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), [Figura 2](#).

Los valores del albedo, la tasa de Bowen y la rugosidad de la superficie para cada categoría de uso del suelo fueron ajustados para Cuba según se recomienda en la Guía metodológica para la implementación del sistema de modelos AERMOD con datos locales incompleta ([Turtós, 2012](#)).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la ciudad de Cienfuegos se identificaron un total de 56 fuentes fijas de contaminación atmosférica (hornos 11, Calderas 29 y motores 16) distribuidas en 23 entidades, [Figura 3](#). La mayor parte de las fuentes se correspondieron a calderas de vapor de diésel y fuel-oil y en menor medida a hornos y motores. Dentro de la ciudad se encuentra un grupo de generación distribuida de diésel ubicado en la zona de Junco Sur, el cual cuenta con 16 motores.

La distribución espacial de las fuentes mostró la presencia de tres zonas dentro de la ciudad tal y como describen Cruz *et al.* (2014). La primera está ubicada hacia el sur donde se agrupan la mayor cantidad de fuentes relacionadas con el sector de la salud (Hospital Clínico-Quirúrgico, Universidad de Ciencias Médicas, Hospital Pediátrico y Hogar de Ancianos), así como otras entidades como el Instituto Superior Pedagógico, Estadio de béisbol y la lavandería de Servisa. En esta zona también se encuentra el GEP descrito anteriormente.

Tabla 3. Factores de emisión utilizado para el cálculo de las emisiones en la Termoeléctrica.

Contaminante	Factor de emisión (g/kg)		Referencia
	Fuel Oil		
NO _x	4.38		CUBAENERGIA*
SO ₂	39.7		CUBAENERGIA*
PM ₁₀	2.85		AP-42
PM _{2.5}	2.12		AP-42
CO	9.0		CUBAENERGIA*
COVDM	0.03		AP-42

* Fuente: [Meneses et al., 2018](#)

La segunda zona se ubica hacia el centro muy cercana a la calzada de Dolores o avenida 64 una de las principales arterias viales de la ciudad y cubre la zona industrial I. En esta se encuentran la mayor parte de las fuentes relacionadas con la industria alimenticia (la Torre factora de café, la Empresa de Bebidas y Licores representada por la fábrica de refrescos, la fábrica de conservas El Faro y la fábrica de barquillos) además del Centro Ambulatorio Especializado (CEA) y el Comedor de Educación Municipal.

Por último, hacia el noroeste se concentran el resto de las fuentes contaminantes las cuales conforman las zonas industriales II y III de la ciudad. En estas se ubican las industrias

relacionadas con el sector energético, químico y portuario.

El inventario de emisiones realizado en las principales fuentes fijas de la ciudad de Cienfuegos para el año base 2014 se muestra en la [tabla 4](#), donde se aprecian las emisiones a la atmósfera en ton/año de los principales contaminantes atmosféricos que provocan diversos impactos a la salud humana, los ecosistemas terrestres y acuáticos. El contaminante más emitido a la atmósfera en la ciudad es el SO₂, seguido del NO₂, mientras que el CO ocupa el tercer lugar entre las emisiones gaseosas, [Figura 4](#). Por lo tanto, los compuestos gaseosos derivados de la quema de los combustibles fósiles son los principales contaminantes emitidos por las fuentes fijas en el

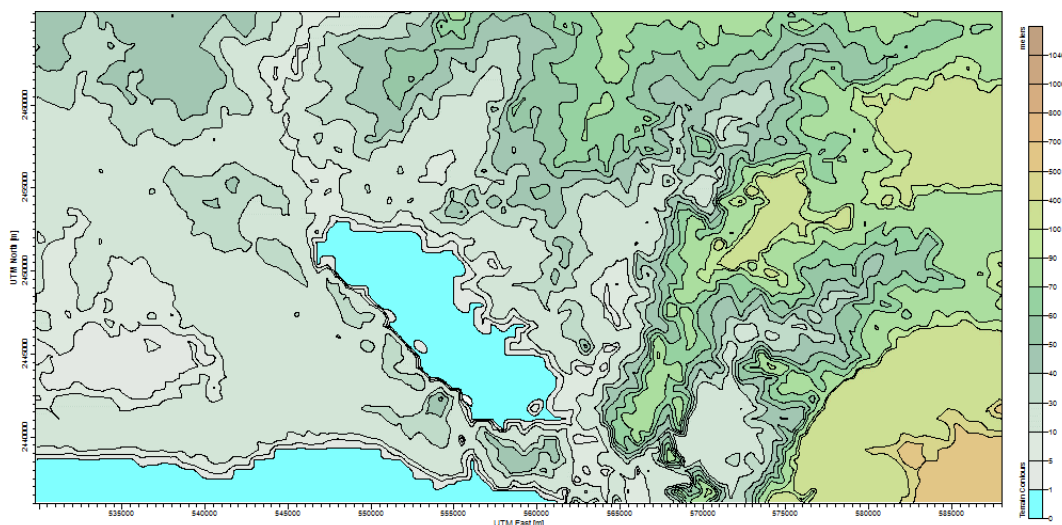


Figura 2. MDE utilizado en la modelación.

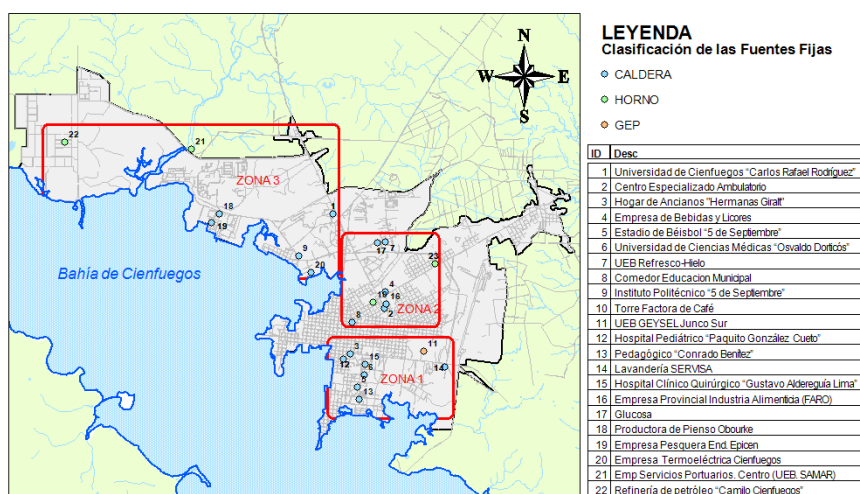


Figura 3. Distribución de Fuentes Fijas de contaminación atmosférica de la provincia Cienfuegos.

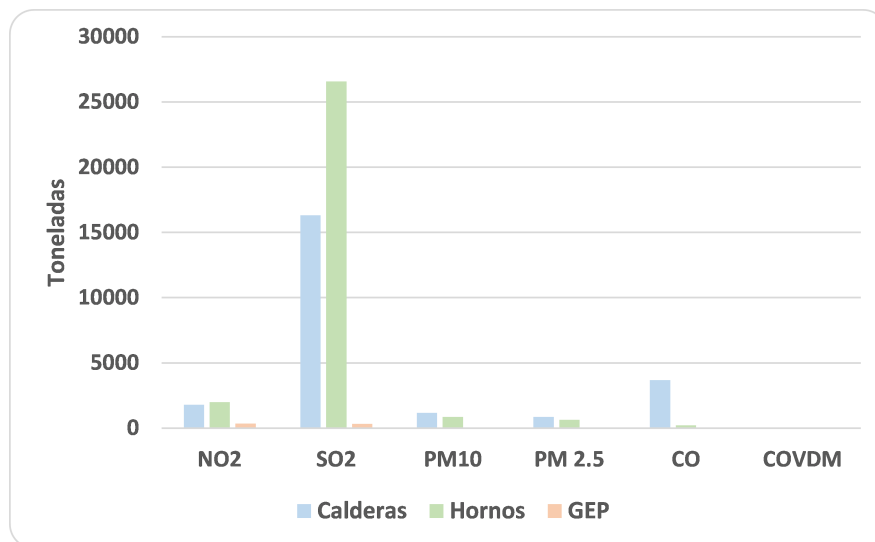


Figura 4. Emisiones de contaminantes por tipo de fuentes en la ciudad de Cienfuegos. Año 2014

territorio. Le siguen en magnitud el material particulado (PM10 y PM2.5) y por último los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano.

En cifras totales, la emisión de SO₂ es de 43 205 toneladas al año, lo que representó el 78.8 % de los contaminantes principales. El NO₂ con una emisión de 4 136 toneladas fue el segundo en cantidad con un 7.5 % del total seguido por el CO que representó el 7.1 % de las emisiones, con 3 894 toneladas, [Tabla 4](#).

El 99 % de las emisiones del SO₂ provinieron de las calderas y hornos dentro de ellos la Termoeléctrica y la Refinería son las que emitieron la mayor parte con más de 42 mil toneladas al año, [Figura 5](#). Las refinerías y termoeléctricas son industrias consideradas como las más contaminantes a la atmósfera en el país, ([Cuesta et al., 2017](#)). Estas fuentes producen grandes emisiones por el alto contenido de azufre en el combustible utilizado.

En el caso del NO₂ igualmente estas fuentes fueron las de mayores emisiones, a las que se le sumó el GEP Junco Sur, concentrando entre las tres el 99.9 % de las emisiones en el año 2014, [Figura 6](#).

Las mayores emisiones de CO y material particulado pertenecieron a las calderas con el 95 % y 58 % respectivamente, [Figuras 7 y 8](#).

Las entidades pertenecientes al Ministerio de Energía y Minas son las mayores emisoras de contaminantes a la atmósfera en la provincia con el 99 % de las emisiones. Fuera de este organismo, el Ministerio de Salud es el que concentra las mayores emisiones en la ciudad dado en lo fundamental por la cantidad de entidades de salud que usan calderas para la generación de vapor.

Dispersión del SO₂ y NO₂

El viento presentó una dirección predominante de región nordeste con una frecuencia del 22 % en el año 2014. No obstante, se puede apreciar que entre el norte-nordeste y el este-nordeste se agrupa más del 50 % de la frecuencia anual, [Figura 9](#).

La velocidad media anual fue de 8.5 km/h. Las mayores velocidades del viento se alcanzaron con rumbos de región sur alcanzando más de 12 km/h como media. El comportamiento mensual indica que los meses de marzo y abril presentaron los mayores valores.

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos de la modelación de la dispersión de contaminantes en la zona de la ciudad de Cienfuegos, teniendo en cuenta las emisiones de las principales fuentes fijas en el año 2014.

El dióxido de azufre (SO₂), es un gas incoloro, de olor acre, soluble en agua, reactivo e irritante para el sistema respiratorio y puede conducir, con una exposición de larga duración, al incremento de enfermedades de las vías respiratorias. Es un gas

que puede ser emitido a la atmósfera por fuentes antropicas y naturales. Las principales fuentes antropicas son las asociadas a la quema de combustibles fósiles, biomasa y a la fundición de metales. Las emisiones naturales de azufre son de los océanos en la forma de dimetilsulfuro y las emisiones volcánicas. Dichas emisiones

Tabla 4. Emisiones de los contaminantes atmosféricos principales por fuente en la ciudad de Cienfuegos durante el 2014, en Toneladas al año (Ton/Año).

Entidad	NO ₂		SO ₂		PM ₁₀		PM _{2.5}		CO		COVDM	
	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)
Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez"	0.17	0.00	2.04	0.00	1.34E-02	0.00	9.12E-03	0.00	2.88E-02	0.00	2.35E-03	0.01
Centro Especializado Ambulatorio	0.13	0.00	1.61	0.00	1.06E-02	0.00	7.22E-03	0.00	2.28E-02	0.00	1.86E-03	0.01
Hogar de Ancianos "Hermanas Giralt"	0.19	0.00	2.29	0.01	1.51E-02	0.00	1.03E-02	0.00	3.24E-02	0.00	2.65E-03	0.01
Empresa de Bebidas y Licores	0.04	0.00	0.47	0.00	3.08E-03	0.00	2.09E-03	0.00	6.60E-03	0.00	5.39E-04	0.00
Estadio de Béisbol "5 de Septiembre"	0.03	0.00	0.34	0.00	2.27E-03	0.00	1.54E-03	0.00	4.86E-03	0.00	3.97E-04	0.00
Universidad de Ciencias Médicas "Osvaldo Dorticós"	0.08	0.00	0.97	0.00	6.41E-03	0.00	4.35E-03	0.00	1.37E-02	0.00	1.12E-03	0.00
UEB Refresco-Hielo	0.04	0.00	0.47	0.00	3.08E-03	0.00	2.09E-03	0.00	6.60E-03	0.00	5.39E-04	0.00
Comedor Educación Municipal	0.10	0.00	1.19	0.00	7.84E-03	0.00	5.32E-03	0.00	1.68E-02	0.00	1.37E-03	0.00
Instituto Politécnico "5 de Septiembre"	0.09	0.00	1.09	0.00	7.15E-03	0.00	4.85E-03	0.00	1.53E-02	0.00	1.25E-03	0.00
Torre Factora de Café	0.13	0.00	1.58	0.00	1.04E-02	0.00	7.07E-03	0.00	2.23E-02	0.00	1.82E-03	0.01
UEB GEYSEL Junco Sur	349.49	8.45	328.93	0.76	5.14E+00	0.25	2.57E+00	0.17	2.96E+00	0.08	3.70E+00	11.99
Hospital Pediátrico "Paquito González Cueto"	0.55	0.01	7.33	0.02	2.36E-01	0.01	1.78E-01	0.01	5.85E-02	0.00	4.10E-03	0.01
Pedagógico "Conrado Benítez"	0.09	0.00	1.20	0.00	3.87E-02	0.00	2.91E-02	0.00	9.60E-03	0.00	6.72E-04	0.00
Lavandería SERVISA	1.66	0.04	22.19	0.05	7.14E-01	0.04	5.37E-01	0.04	1.77E-01	0.00	1.24E-02	0.04
Hospital Clínico Quirúrgico "Gustavo Aldereguía Lima"	1.70	0.04	22.66	0.05	7.30E-01	0.04	5.49E-01	0.04	1.81E-01	0.00	1.27E-02	0.04
Empresa Provincial Industria Alimenticia (FARO)	0.54	0.01	7.19	0.02	2.31E-01	0.01	1.74E-01	0.01	5.74E-02	0.00	4.02E-03	0.01
Glucosa	0.59	0.01	7.91	0.02	2.55E-01	0.01	1.92E-01	0.01	6.32E-02	0.00	4.42E-03	0.01
Productora de Pienso Obourke	0.14	0.00	1.87	0.00	6.01E-02	0.00	4.52E-02	0.00	1.49E-02	0.00	1.04E-03	0.00
Empresa Pesquera End. Epicen	0.26	0.01	3.48	0.01	1.12E-01	0.01	8.42E-02	0.01	2.78E-02	0.00	1.94E-03	0.01
Empresa Termoeléctrica Cienfuegos	1790.08	43.28	16225.18	37.55	1164.78	57.44	866.43	57.22	3678.25	94.46	12.26	39.73
Empresa Servicios Portuarios. Centro (UEB. SAMAR)	0.05	0.00	0.68	0.00	2.18E-02	0.00	1.64E-02	0.00	5.40E-03	0.00	3.78E-04	0.00
Refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos"	1989.88	48.11	26564.75	61.48	855.33	42.18	643.27	42.48	212.07	5.45	14.84	48.10
Fábrica de Barquillos	0.01	0.00	0.11	0.00	3.63E-03	0.00	2.73E-03	0.00	9.00E-04	0.00	6.30E-05	0.00
Total	4136.02		43205.5		2027.7		1514.1		3894.0		30.9	

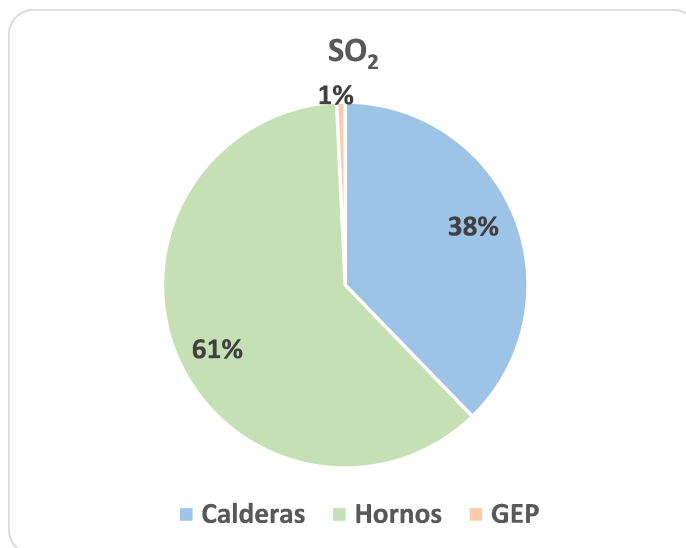


Figura 5. Proporción relativa de las emisiones de SO₂ en la provincia Cienfuegos por tipo de fuente.

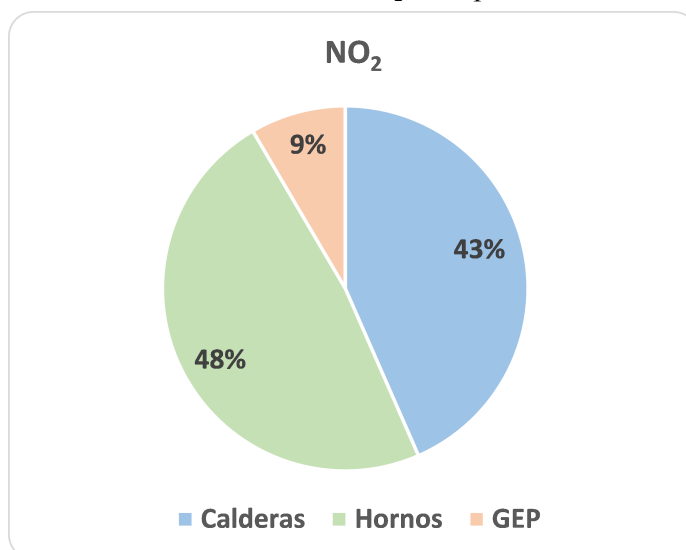


Figura 6. Proporción relativa de las emisiones de NO₂ en la provincia Cienfuegos por tipo de fuente.

contribuyen a la formación igualmente de las lluvias ácidas.

En la [Figura 10](#) se muestra el mapa del promedio de las concentraciones anuales durante el 2014, para el SO₂. Los valores de concentraciones anuales para este contaminante superaron la CMA de 40 µ/m³ ([ONN, 2014a](#)) en las zonas alrededor del GEP “Junco Sur”, comprometiendo notablemente la calidad del aire en estas áreas.

En esta modelación predominaron los vientos de región nordeste como ya se dijo, por lo que los penachos toman la orientación nordeste-suroeste. Como se observa, existió un corrimiento de las concentraciones asociadas a los mayores emisores

(Refinería y Termoeléctrica) fuera de la ciudad e incluso fuera de la ventana de trabajo. Esta situación está debida a la significativa altura de sus chimeneas (192 y 100 m respectivamente). A mayor altura de la chimenea hay un desplazamiento del punto máximo de concentración, además a mayor altura aumenta también la velocidad del viento en la zona de descarga de los gases lo cual favorece ese desplazamiento ([Patiño, 2007](#)).

El NO₂ es un gas tóxico e irritante, este junto al óxido nitroso (NO) son algunos de los principales contaminantes en las ciudades. En la naturaleza se produce por los incendios forestales o las

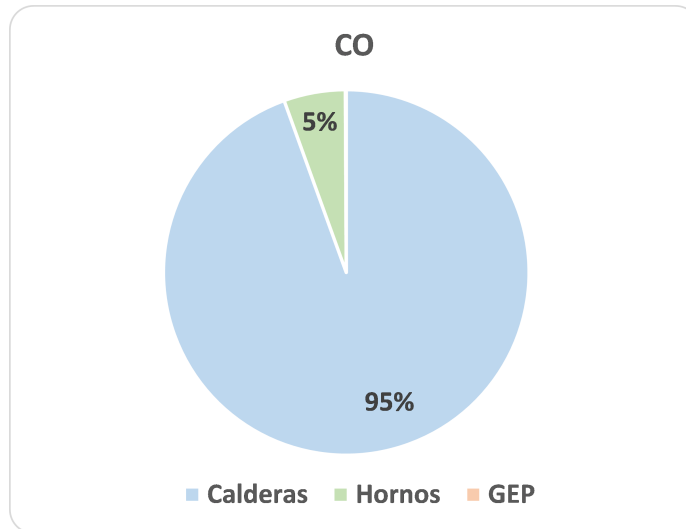


Figura 7. Proporción relativa de las emisiones de SO_2 en la provincia Cienfuegos por tipo de fuente.

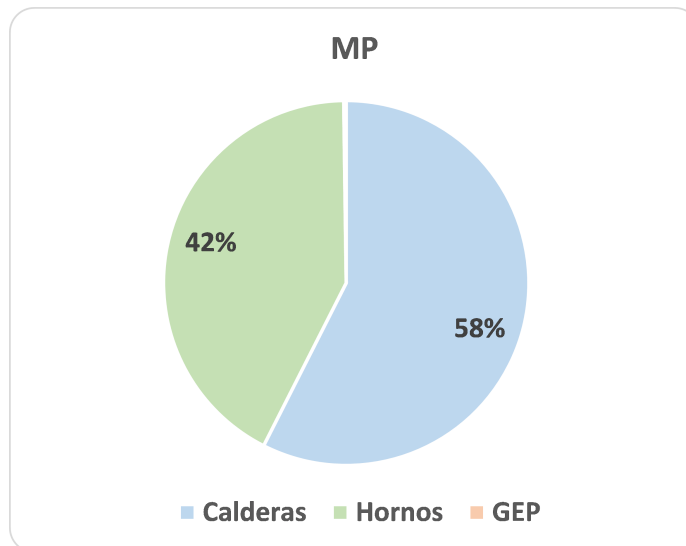


Figura 8. Proporción relativa de las emisiones de **Material Particulado (MP)** en la provincia Cienfuegos por tipo de fuente.

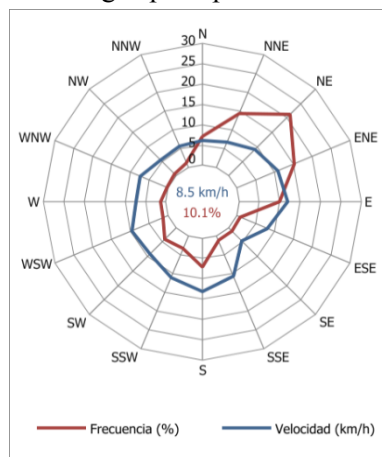


Figura 9. Rosa de los vientos anual en la estación meteorológica de Cienfuegos. Año 2014.

erupciones volcánicas. También se produce de forma natural por la descomposición de nitratos orgánicos. La mayor parte tiene su origen en la oxidación del NO que se produce en la combustión de los motores de los vehículos, fundamentalmente los de diesel. El NO emitido por los motores, una vez en la atmósfera, se oxida y se convierte en NO₂. Es también un potenciador del material particulado, sobre todo de partículas finas MP2,5 que son las más perjudiciales. En su reacción con la luz ultravioleta del sol es un precursor del ozono troposférico.

En la [Figura 11](#) se muestra el mapa del promedio de las concentraciones anuales durante el 2016, para el NO₂. Al igual que en el caso anterior las zonas más comprometidas con el deterioro de la calidad del aire como media anual se encuentran

alrededor del GEP “Junco Sur” donde se supera la CMA que en el caso de este contaminante es de 35 μ/m³ (ONN, 2014a).

Los resultados de la modelación muestran a modo general las características de la dispersión de los principales contaminantes de la atmósfera en la ciudad de Cienfuegos a resolución anual. No obstante, este análisis es solo una aproximación al comportamiento real puesto que la distribución de las concentraciones puede variar en los diferentes horarios del día. En el área de estudio, como ya se dijo, durante el horario de mayor calentamiento hay un cambio en la dirección del viento debido a la entrada de la brisa marina que tiene direcciones opuestas a la media anual. También el comportamiento puede variar debido a situaciones sinópticas específicas, como la entrada de un

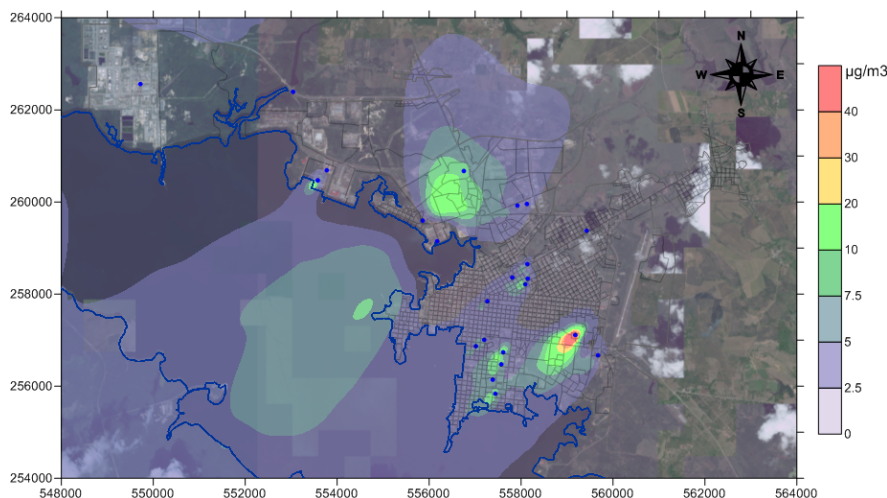


Figura 10. Concentraciones promedio anuales de SO₂ en la ciudad de Cienfuegos, año 2014.

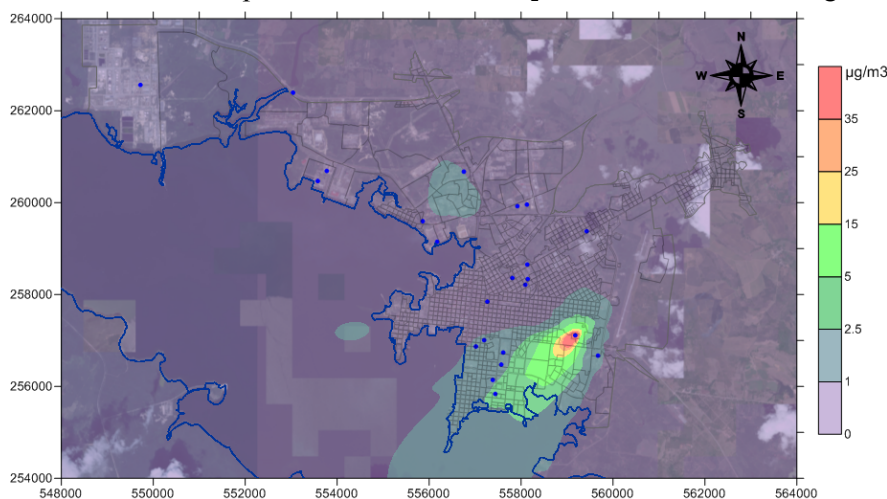


Figura 11. Concentraciones promedio anuales de NO₂ en la ciudad de Cienfuegos, año 2014.

sistema frontal donde predominen vientos del cuarto cuadrante y además varíen las condiciones de estabilidad atmosférica (Norlan y Carracedo, 2018). Es por ello que sería de mucha importancia realizar la modelación en escalas temporales menores (diaria, horaria).

CONCLUSIONES

En el año 2014 fueron inventariadas en la ciudad de Cienfuegos 56 fuentes de fijas de contaminación atmosférica (hornos 11, Calderas 29 y motores 16) repartidas en 23 entidades. Según estas fuentes son generados en la ciudad un total de 4136.02 t de óxido de nitrógeno (NO_x), 43205.5 t de dióxido de azufre (SO₂), 7295.66 t de material particulado PM₁₀, 2027.7 t de material particulado PM_{2.5}, 1514.1 t de monóxido de carbono (CO) y 30.9 t de Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVDM).

Las fuentes contaminantes que más emiten en la ciudad de Cienfuegos son la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” y la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” con un total de 54 017.13 ton/año.

Las zonas ubicadas al suroeste a sotavento del GEP “Junco Sur” son las más perjudicadas en cuanto a recepción de contaminantes, asociado a la acción de los vientos predominantes en el año.

Los resultados obtenidos son una valiosa herramienta de gestión ambiental para el control y mitigación de la contaminación atmosférica en la provincia Cienfuegos.

REFERENCIAS

- Barcia, S. 2012. *Nueva Guía Climática de la Provincia de Cienfuegos*, Resultado Científico, Cuba: Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Instituto de Meteorología, 83 p.
- Cruz, I.; Cabello, J. J.; Sorinas, L.; Varela, A. R. y Barcia, S. 2015. “Evaluación de la calidad del aire urbano en Cienfuegos. Mejoras en el desempeño ambiental local”. *Ecosolar*, 52(Abril-Junio). Available: <Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/Ecosolar52/HTML/Articulo02N.htm> > [Consulted: septiembre 18, 2017].
- Cuesta, O., Wallo, A., Montes de Oca, L., Pierra, A., Tricio, V. 2010. “Calidad del aire en zonas urbanas de Cuba”. In: *CONAMA II, Congreso de Medio Ambiente*, España, Available: <Available: <http://www.conama10.es/web/index.php> >, [Consulted: mayo 6, 2018].
- Cuesta, O., Collazo, a., González, J., Fonseca, M., Fernández, A.C., Rodríguez, Y., García, E., Carrillo, E., Sosa, C., Manrique, R., Sánchez, P., Manso, R., Batule, L., López, R., Expósito, P.J., Marcelo, G., Alonso, A., Menéndez, S., 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*, Resultado Científico, Cuba: Instituto de Meteorología, 188 p.
- Cuesta, O.; Sosa, C.; Iraola, C.; González, Y.; Núñez, V.; Fonte, A.; Imbert, C.; Barcia, S.; Gómez, Y. y Portal, D. 2017. “Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas”. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2):178-190, ISBN 0864-151X.
- Dirección general de salud ambiental (Digesa) 2005. Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos, Perú. Available: <Available: http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf > [Consulted: febrero 22, 2018]
- EMEP/CORINAIR 2007. *Guía para la realización del inventario de emisiones atmosféricas de la Agencia Europea de Medioambiente*. Available: <Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5> > [Consulted: noviembre 15, 2017]
- EPA. 1998. Compilation of air pollutant emission factors, volume 1: Stationary point and area sources, fifth edition, AP-42. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, Carolina del Norte.
- González, M. 2010. *Estudio de la calidad del aire en el entorno de la CUJAE*. Tesis de Maestría, Cuba: ISJAE, 55 p.
- Hernández, A., Reinoso, M., y Hernández, F. 2017. “Contaminantes atmosféricos emitidos por centrales azucareros cienfuegueros”. *Universidad y Sociedad*, 9(5):70-74. Available:

- Available: <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus> , [Consulted: mayo 6, 2018].
- Lecha, L. B. 1993. *Estudio bioclimático de la provincia de Cienfuegos*. Cuba: Editorial Academia, 131 p., ISBN: 978-959-02-0027-4.
- Meneses, E.; Roig, A.; Paz, E.; Alonso, D. y Alvarado, J. 2018. “Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba”. *Revista Cubana de Meteorología* , 24(1):1-9, ISBN 0864-151X.
- Peña, J. N. y Carracedo, A. 2018. “Estimación de las emisiones provenientes de fuentes fijas en la ciudad Las Tunas” *Revista Cubana de Meteorología* , 24(sp):374-384-9, E-ISSN: 0864-151X.
- Núñez, V.; Moya, A. S.; Hernández, W.Ch.; Rodríguez, R.; Osés, R.; Otero, M., Purón, M.; Martínez, I.; Herrera, I.; Pedraza, J.; Morales, M.C.; Martín, J. y Sánchez, D. 2012. “Fuentes fijas responsables de las máximas emisiones de SO₂ en la provincia de Villa Clara, Cuba. Primer semestre del 2011”. In: *Convención Internacional Trópico 2012*, Cuba, ISBN, 978-959-282-079-1.
- Oficina Nacional de Normalización 2014a. Calidad del aire. Contaminantes. Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables, NC 1020. La Habana: ONN, 2014.
- Oficina Nacional de Normalización 2014b. Guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos desde fuentes industriales estacionarias. NC 1049. La Habana: ONN , 2014.
- ONEI 2015. *Anuario Estadístico de Cienfuegos 2015*. Edición 2016. Cuba: Oficina Nacional de Estadística e Información, 213 p.
- ONU 2014. *La Situación Demográfica en el mundo*, New York: Organización de Naciones Unidas, 38 p.
- Patiño, A. 2007. “Modelos de dispersión gaussianos. Principales parámetros que afectan la dispersión de contaminantes en el aire”. In: *Seminario de Combustión Industrial Aplicada*, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 37 p.
- PNUMA 2009. GEO Cuba 2007. Evaluación del Medio Ambiente cubano, Cuba, 292 p.
- Rodríguez, D. L.; Echevarría, A.; Sánchez, O.; Cuesta, A.; Wallo, M.; Miló, A.; Gato 2009. “Resultados preliminares de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos producidos por las fuentes fijas en la ciudad de Pinar del Río y la comunidad de Santa Lucía”. In: *V Congreso Cubano de Meteorología*, Cuba, ISBN 978-959-7167-20-4.
- Roig, A. 2016. “Actualización de Factores de Emisión del sector eléctrico. Cubaenergía”. In: *Taller CONTAT 2016*, Cuba.
- Turtos, L. 2012. *Evaluación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes estacionarias mediante modelos refinados*. Tesis de Doctorado, Cuba: Universidad de la Habana. 151 p.
- U.S. EPA, 1995a Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Research Triangle Park, Carolina del Norte.
- Usagawa, Z.; Corvo, F.; Machín, E. y Usagawa, R. 2007. “Contaminación atmosférica y calidad de vida en entornos de producción de derivados de caña de azúcar. Estudio de caso “Antonio Sánchez””. In: *IV Congreso Cubano de Meteorología*, Cuba, ISBN: 978-959-7167-1.

Antonio Frías López. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. E-mail: frias@cfg.insmet.cu

Sinaí Barcia Sardiñas. Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. E-mail: sinai@cfg.insmet.cu

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

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/)