

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG y su influencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara

Influence on air quality of sulfur dioxide emissions from fixed agricultural sources in Villa Clara

Vladimir Núñez Caraballo^{1*}, Rosabel Rodríguez Rojas¹, Lomberto Gómez Camacho¹, Idalberto Herrera Moya², Mayra Caridad Morales Pérez²

¹ Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Marta Abreu 59 altos, esquina a Juan Bruno Zayas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP 50100

² Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP 54830

**Autor para correspondencia: vladimir.nunez@vcl.insmet.cu*

RESUMEN

El dióxido de azufre en el año 2014 representó el segundo contaminante de mayor emisión a la atmósfera emanado por fuentes fijas en Villa Clara, siendo las entidades consumidoras de fueloil las máximas responsables debido al porcentaje elevado de azufre. Los objetivos de este trabajo han sido cuantificar la carga contaminante del dióxido de azufre emitida por fuentes fijas del MINAG, determinar el porcentaje que representa estas emisiones del total de ellas, por municipios y por consumo de combustible, evaluar la calidad del aire y proponer medidas de reducción a la emisión. El método aplicado para determinar la emisión fue empleando mediciones directas con analizadores de gases y factores de emisión de AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la evaluación de la calidad del aire se realizó a través de la modelación de la dispersión del contaminante con el software ISC-AERMOD Versión 3,15 de la EPA. Los resultados muestran que la carga contaminante del dióxido de azufre fue de 68 t, el 80 % emitido en el municipio de Santo Domingo y el 97 % por quemar fueloil. La calidad del aire es aceptable, deficiente y pésima en diferentes áreas cercanas a las fuentes de emisión. Al aplicar las medidas propuestas se puede elevar la eficiencia energética, reducir el consumo de combustible al 3 % (38 t) y la emisión en 1,8 t, lo que favorece los costos de las entidades y propicia menor deterioro de la calidad del aire en las zonas afectadas.

Palabras claves: óxidos de azufre, contaminación atmosférica, estándares de calidad del aire

ABSTRACT

The dioxide of sulfur in 2014 represented the second pollutant of more emission to the atmosphere for the fixed sources in Villa Clara, being the entities fuel oil consumers the responsible maxims. The objectives of this work have been to quantify the polluting load of the dioxide of sulfur emitted by the sources of the MINAG, to determine the percentage that represents these emissions of the total, for municipalities and consumption of fuel, to evaluate the quality of the air and to propose measures of reduction of the emission. The method applied was using direct mensuration with analyzers of gases and factors of emission of AP-42 of the Agency of Environmental Protection of the United States (EPA), the evaluation of the quality of the air was carried out through the moderation of the dispersion of the pollutant with the software ISC-AERMOD Version 3.15 of the EPA. The results show that the polluting load of the dioxide of sulfur was of 68 t, 80 % emitted in the municipality of Santo Domingo and 97 % to burn fuel oil. The quality of the air is acceptable, faulty and dreadful in near different areas to the emission sources. Applying the measures proposals, the energy efficiency can rise and to reduce the consumption of fuel to 3 % (38 t) and the emission in 1.8 t, favoring the costs of the entities and propitiating smaller deterioration of the quality of the air in the affected areas.

Keywords: oxide of sulfur, atmospheric contamination, standard of quality of the air

INTRODUCCIÓN

Dentro de los problemas ambientales a que están expuestos los ecosistemas, agudizados a partir de la mitad del siglo pasado, se puede mencionar la contaminación atmosférica, principalmente originada por la actividad antropogénica (dado por la quema de combustibles fósiles, el crecimiento del desarrollo industrial y del transporte) que contribuye a la disminución de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza (SEMARNAT, 2013; INECC, 2014).

El dióxido y el trióxido de azufre (SO_2 y SO_3 respectivamente) son óxidos presentes en la atmósfera. La principal fuente antropogénica de estos óxidos es la combustión de carburantes fósiles ricos en azufre (ej. carbón, fueloil, diésel...), lo que representa cerca de un tercio del total del SO_2 atmosférico (INECC, 2014). En Villa Clara las emisiones de SO_2 procedente de las fuentes fijas alcanzan el 21 % del total de emisiones, principalmente porque el 76 % del combustible que se consume es fueloil ligero, medio y pesado, con elevado porcentaje de azufre.

Los inventarios sobre las emisiones de contaminantes a la atmósfera son indispensables para las actividades de gestión y toma de decisiones en materia de calidad del aire a nivel local, regional y global; pues además de ayudar a identificar la problemática, son un instrumento que permite evaluar el impacto de las medidas de control aplicadas a la misma (Hidalgo, 2014).

Un inventario de emisiones contempla la lista completa de todas las fuentes o categorías de fuentes y su descripción detallada incluye la caracterización del área geográfica circundante, identifica todos los contaminantes emitidos por cada instalación para diferentes intervalos de tiempo (media hora, una hora, 24 horas y anuales) (DIGESA, 2005).

Para calcular las emisiones de una fuente, por lo general se eligen los datos provenientes de los muestreos de emisión de la fuente específica o monitoreos de emisión continua con una estación automática instalada permanentemente sobre la fuente. Estos datos proporcionan la mejor representación sobre las emisiones de fuentes evaluadas, sin embargo, no siempre se encuentran disponibles y aun

cuando lo estén, los escasos datos de esta naturaleza no reflejan la variabilidad de las emisiones reales en el tiempo, siendo específicos de la operación del equipo en condiciones muy particulares. Pese a lo expuesto, el cálculo de las emisiones utilizando factores de emisión constituye un método factible y adecuado (EASTERN RESEARCH GROUP, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999; DICTUC, 2007; Núñez, 2014; Hidalgo, 2014).

Los contaminantes emitidos a la atmósfera son transportados y dispersados por el aire, influenciados por complejos factores tales como la cantidad de turbulencia, las inversiones térmicas y la topografía compleja. La modelación de la dispersión del contaminante permite calcular la concentración de este a nivel del suelo y a diferentes distancias de la fuente (Ministry for the Environment Manatu Mo Te Taiao, 2004; Núñez, 2018).

Para medir la calidad del aire se requiere del monitoreo atmosférico con el objetivo de formular los estándares de calidad de aire y llevar a cabo estudios epidemiológicos que relacionen los efectos de los contaminantes con los daños en la salud. Los métodos de monitoreo incluyen a los muestreadores pasivos, activos, analizadores automáticos, sensores remotos y los bioindicadores (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2005).

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es un indicador global de la calidad del aire en un momento determinado, en una zona representada por una estación de monitoreo en específico. Las fuentes contaminadoras tienen la responsabilidad de cumplir con las normativas prescriptas. El control individual sobre cada uno de los responsables de emisiones y cumplimiento de las normativas es importante, aunque no suficiente, la calidad del aire puede verse afectada aun cuando los responsables de las emisiones cumplan con lo establecido, dado por la ubicación cercana de un elevado número de estos y/o las condiciones meteorológicas desfavorables para el transporte y dispersión de los contaminantes

(EPA, 2012; Núñez, 2015).

Varias especies de animales, incluyendo el hombre, responden al dióxido de azufre. El anhídrido sulfuroso al ser inhalado se hidrata con la humedad de las mucosas constituyendo un riesgo para la salud de las personas y otras especies animales al producir constricción bronquial. De acuerdo a los resultados epidemiológicos de morbilidad, mortalidad o cambios en la función pulmonar en grupos de población sensible, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que la concentración de SO₂ no supere los 500 µg/m³ para una exposición de 10 minutos, 250 µg/m³ para un periodo de 24 horas, o 50 µg/m³ para un año (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2005). Cuba (2014) establece una concentración máxima de 250 µg/m³ para una exposición de una hora, 45 µg/m³ para un periodo de 24 horas y 40 µg/m³ como media anual.

Los efectos de la contaminación aérea sobre la salud se dividen en cuatro grupos, primero los efectos respiratorios a corto plazo (horas o días) o efectos agudos que ocurren repentinamente, los efectos respiratorios a largo plazo o crónicos que se caracterizan por su persistencia en periodos largos de tiempo (años), el tercero, cáncer al pulmón y por último efectos no-respiratorios. Las reacciones que produce la contaminación atmosférica en la salud humana se fundamenta en estudios toxicológicos y epidemiológicos (Pope, 2002; Tramuto, 2011; Núñez, 2015).

En la provincia de Villa Clara el inventario de fuentes fijas del año 2014 constituye la base fundamental para la ejecución de este trabajo, lo que permite identificar las fuentes principales responsables de las mayores emisiones de SO₂ a la atmósfera, sus principales características tecnológicas y técnicas, así como el deterioro que ellas causan a la calidad del aire en zonas cercanas a estas.

Este trabajo tuvo como objetivo cuantificar la carga contaminante de SO₂ emitida a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG en la provincia de Villa Clara y evaluar su influencia

en los estándares de la calidad del aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las fuentes de Villa Clara que son analizadas (Tabla 1) son enunciadas por nombre y el combustible que consumen. Los datos corresponden al inventario de fuentes fijas en la provincia de Villa Clara durante el 2014 fue elaborado en el Centro Meteorológico Provincial, cumpliendo lo establecidos en la NC 1049 de Cuba (2014).

Para determinar las emisiones se llevaron a cabo mediciones de acuerdo con los métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), adoptadas por Cuba (2017) en la NC 803: 2017. Estos métodos fueron las mediciones directas (utilizando analizadores de gases del tipo ECOM SG-PLUS y Testo 300 XL-1) y los factores de emisión disponibles para un gran número de procesos importantes en la base de datos FIRE, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2004).

Para este estudio se realizó la modelación de la dispersión del SO₂ a escala local con el uso de un modelo de pluma Gaussiana implementado en el software ISC-AERMOD View versión 3.15 * para Windows® de la EPA. En este modelo la concentración es función de las condiciones del terreno, la meteorología y los parámetros de emisión de la fuente. Los dos primeros factores, permanecen constantes, pero el último puede ser variado para modificar el efecto de las fuentes en la concentración resultante. Estos parámetros incluyen la localización de la fuente, altura de la chimenea,

tasa de emisión, temperatura de los gases de salida, velocidad de salida de los gases y diámetro interior de la chimenea en el punto de liberación.

Los datos meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, lluvia, estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla) empleados en la modelación corresponden a los valores obtenidos por las estaciones meteorológicas del Yabú y Santo Domingo, por ser representativas para las zonas de estudio. Otros datos tenidos en cuenta fueron la topografía y las elevaciones del terreno.

Para la evaluación de la calidad del aire se aplicó lo correspondiente a la NC 111: 2004 "Calidad del aire - Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos" (Cuba, 2004), donde el índice de calidad del aire incluye seis categorías: Buena, Aceptable, Deficiente, Mala, Pésima y Crítica. El valor de la concentración máxima del contaminante durante 24 horas aplicado, es el establecido por Cuba (2014).

Al realizar la auditoría energética (herramienta aplicada para identificar las principales pérdidas energéticas en cada entidad), aspecto factible para realizar durante un periodo de tiempo breve, fueron analizados los siguientes aspectos:

- temperatura del agua de alimentación a la caldera
- recuperación de condensado de los intercambiadores de calor
- pérdidas por mal aislamiento térmico de la red de vapor directo
- válvulas y accesorio

Tabla 1. Datos de las fuentes fijas de emisión

No.	Entidades	Municipios	Combustibles
1	Matadero de Aves	Santa Clara	Fueloil
2	Torrefactora de Café	Santa Clara	Diésel
3	Matadero Empacadora "Salaminas"	Santa Clara	Fueloil
4	Fábrica de Cigarros "Ramiro Lavandero"	Ranchuelo	Fueloil
5	Fábrica de Conservas "Mady"	Santo Domingo	Fueloil

- fugas de vapor
- balance de la demanda de vapor del proceso
- control y evaluación del índice de consumo mensual
- estado técnico del generador de vapor
- intercambiadores de calor

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El consumo de combustible (CC) de cada fuente fija durante el periodo analizado (Figura 1) refleja que las cinco fuentes consumen en su

totalidad 1251 t, del cual el 94 % es fueloil, siendo la de mayor consumo la fábrica de conservas "Mady" del municipio de Santo Domingo. Sin embargo, la carga contaminante emitida a la atmósfera por las fuentes fijas (Figura 2) llega a ser de 68 t, siendo la fábrica de conservas "Mady" la que mayor emite SO_2 con el 80 % del total, originado por la quema del combustible fueloil que posee un elevado porcentaje de azufre.

El análisis de emisión por municipios presenta a Santo Domingo como el mayor emisor (Figura 3). Con todo, la emisión del SO_2

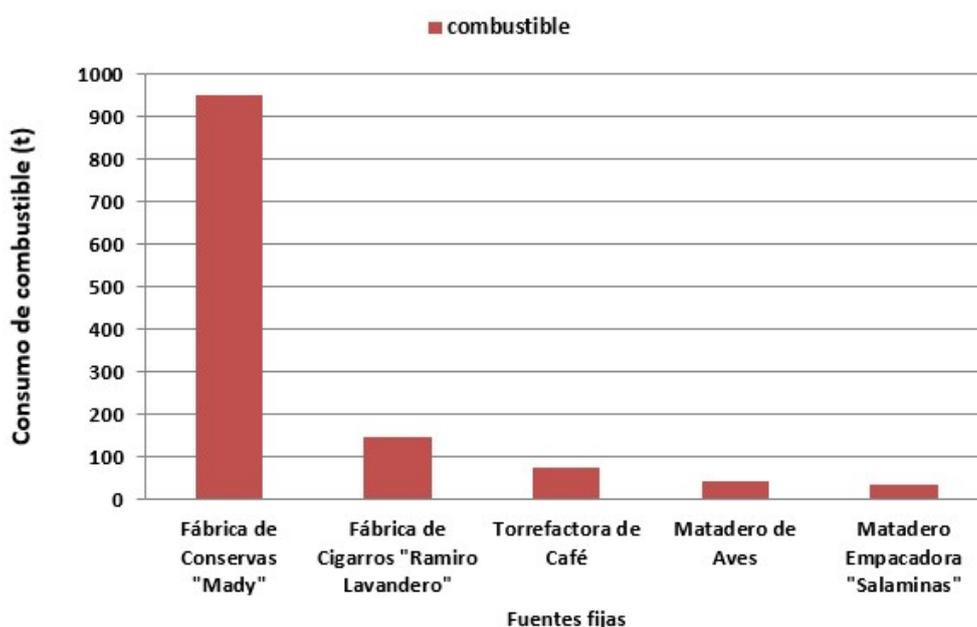


Figura 1. Consumo de combustible por cada fuente fija

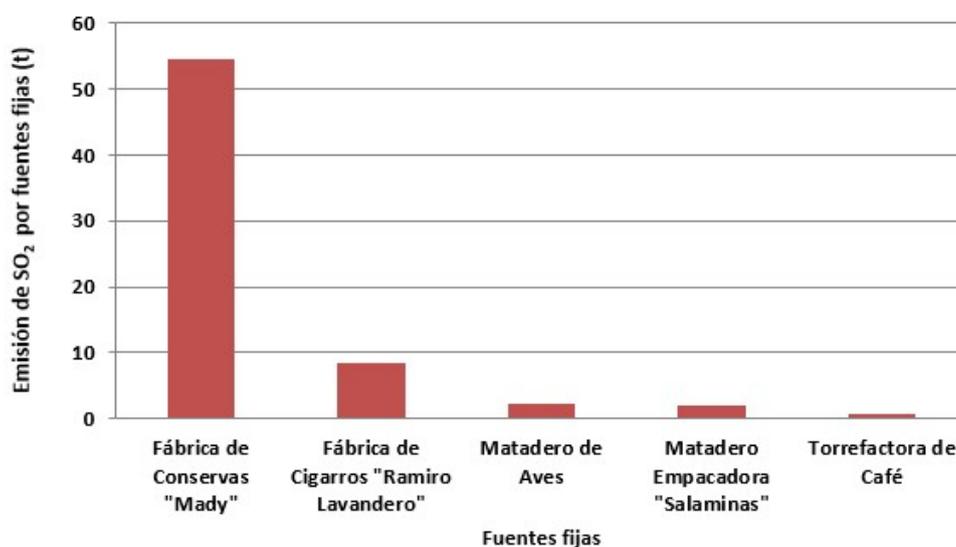


Figura 2. Emisión de SO_2 por las fuentes fijas en Villa Clara

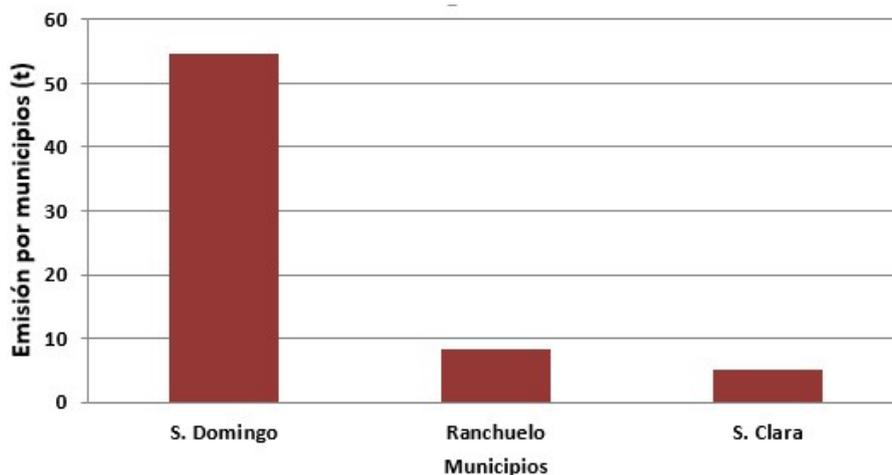


Figura 3. Emisión de SO₂ por municipios

por tipo de combustible expresa que del fueloil se emiten 66 t, lo que representa el 97 % del total de dióxido emitido (Figura 4).

Al evaluar la calidad del aire originada por las emisiones de las fuentes fijas, sobre los asentamientos poblacionales (Figura 5) según un ejemplo de modelación de la dispersión del SO₂ para la fábrica de conservas "Mady", puede estimarse que la calidad del aire alcanza la categoría de Pésima en las zonas cercanas al punto de emisión. Los demás resultados para la evaluación de la calidad del aire pueden ser observados en la Tabla 2, donde, con categoría de "Aceptable" puede mencionarse la

torrefactora de Café, "Deficiente" el matadero de Aves y el matadero empacadora "Salaminas" y "Pésima" la fábrica de cigarros "Ramiro Lavandero". No obstante, en todos los casos existe un riesgo de la población expuesta a cada categoría de calidad del aire que se intensifica para la categoría de "Pésima", con una situación de Alerta según lo establecido por la NC 111: 2004 (Cuba, 2004).

La propuesta de acciones que dan solución a los principales problemas detectados con la auditoría energética, contribuyen al ahorro de combustible y, por ende, la reducción de emisiones a la atmósfera. Esta propuesta es la siguiente:

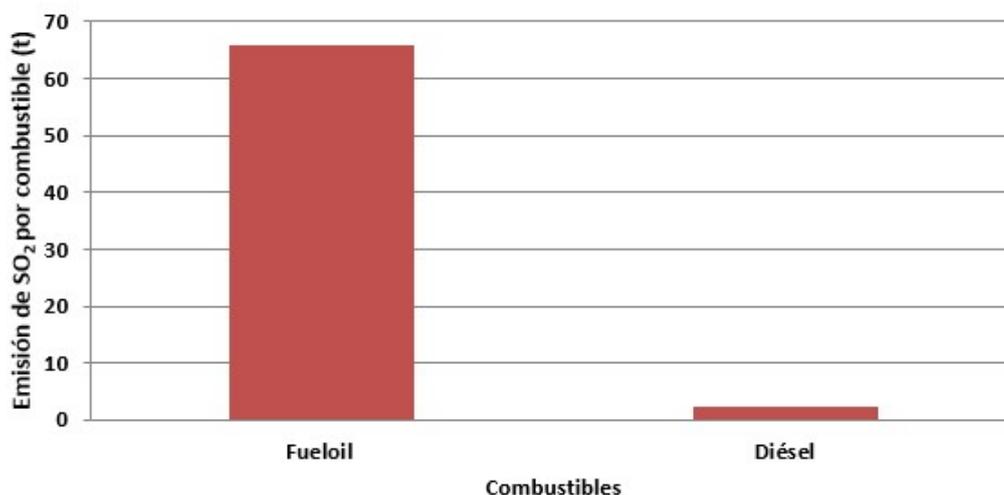


Figura 4. Emisión de SO₂ por tipo de combustible

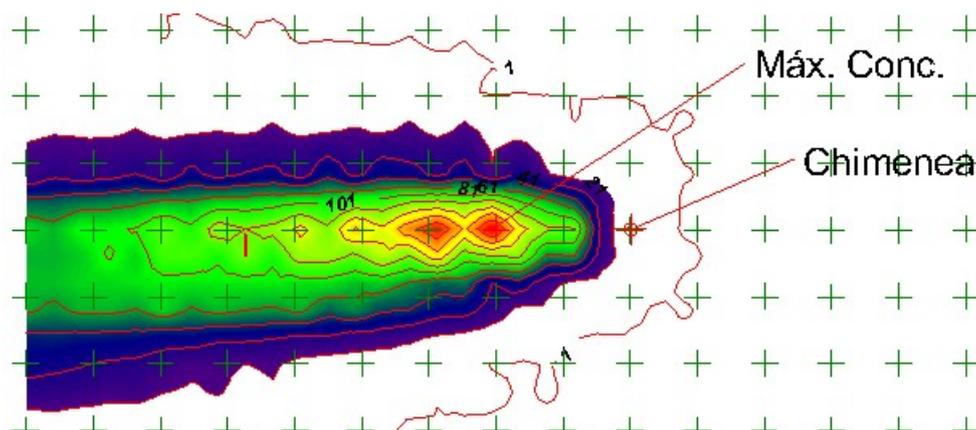


Figura 5. Dispersión del SO₂ en µg/m³ durante 24 horas

1. Elevar la temperatura del agua de alimentación a la caldera hasta que alcance valores óptimos
2. Recuperar los condensados de los intercambiadores de calor
3. Aislar térmicamente la red de vapor directo, válvulas y accesorios
4. Eliminar las fugas de vapor
5. Mantener actualizado el balance de la demanda de vapor del proceso
6. Controlar y evaluar el índice de consumo mensual
7. Cumplir con los mantenimientos programados y las reparaciones para mantener un buen estado técnico del generador de vapor y de los intercambiadores de calor

Al ejecutar las medidas, los posibles resultados a alcanzar en un año después de aplicar las mismas conducen a disminuir el consumo de combustible en los generadores de vapor. La disminución del consumo de combustible puede llegar hasta el 20 % de lo gastado si las deficiencias detectadas sobrepasan el 50 % de las mostradas en la guía

de auditoría energética. Los cálculos estimados se realizaron para una posible disminución del 3 % del consumo de combustible, lo que equivale a 38 t, favoreciendo a los costos de producción de cada entidad, lo que ahorraría miles de dólares al país, teniendo en cuenta el precio actual del combustible (Figura 6).

Al implementar estas medidas, la fuente de mayor ahorro será la fábrica de conservas "Mady" del municipio de Santo Domingo. Asimismo, la reducción de emisión del SO₂ por concepto de disminución del consumo de combustible puede llegar a ser de 1,8 t, siendo del 83 % la reducción en la fábrica de conservas (Figura 7).

CONCLUSIONES

1. La fuente responsable de emitir mayor cantidad de SO₂ es la fábrica de conservas "Mady" del municipio de Santo Domingo.
2. Por el elevado porcentaje de azufre que posee, Fueloil es el combustible que más SO₂ emite al quemarse.
3. La evaluación de la calidad del aire presenta dificultades en las fuentes analizadas

Tabla 2. Evaluación de la calidad del aire para cada fuente

Fuentes fijas	Categorías de la Calidad del Aire
Torrefactora de Café	Aceptable
Matadero de Aves	Deficiente
Matadero Empacadora "Salaminas"	Deficiente
Fábrica de Cigarros "Ramiro Lavandero"	Pésima

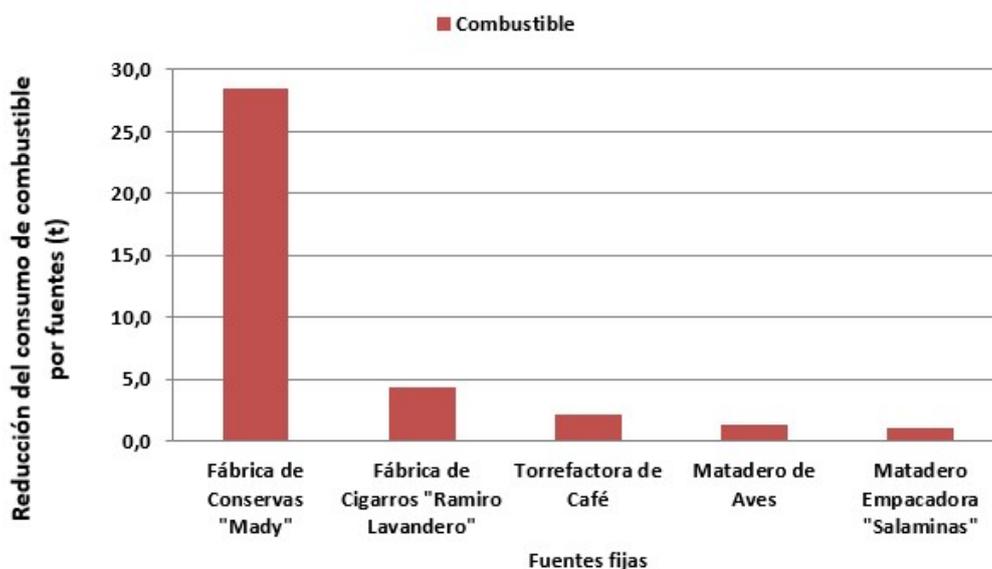


Figura 6. Consumo de combustible que puede ser ahorrado

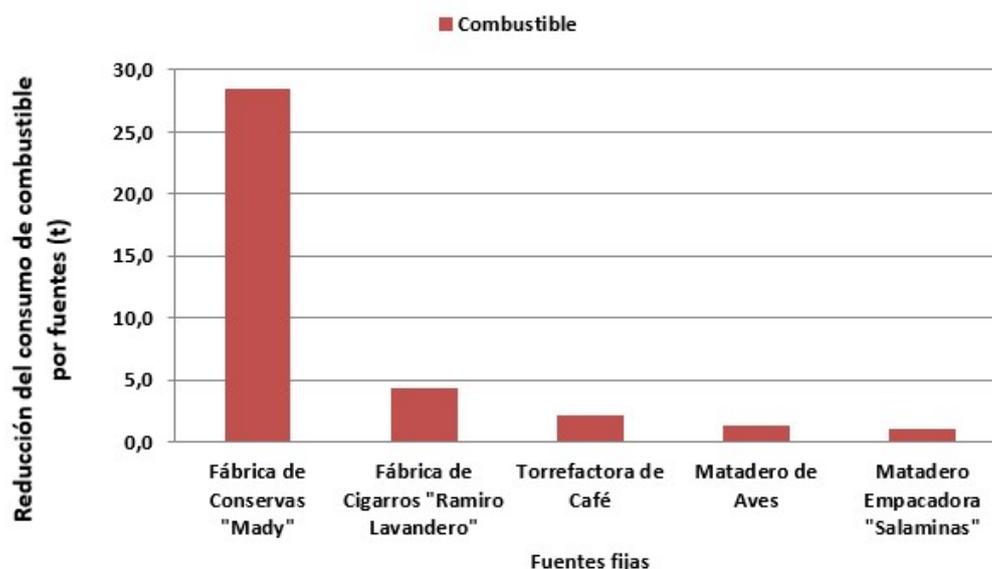


Figura 7. Reducción de la emisión de SO₂ por fuentes

que poseen la categoría de Deficiente y Pésima en el 80 % de las mismas.

4. El impacto ambiental de las medidas de eficiencia energética propuestas es positivo al disminuir el consumo de combustible en 38 t y la emisión de SO₂ en 1,8 t.

BIBLIOGRAFÍA

CUBA. 2004. NC 1020: 2004 Calidad del Aire-Contaminantes-Concentraciones Máximas Admisibles y Valores Guías en zonas

Habitables. Oficina Nacional de Normalización (ONN), Vedado, La Habana, Cuba.

CUBA. 2004. NC 111:2004 Calidad del Aire-reglas para la Vigilancia de la calidad del Aire en Asentamientos Humanos. Oficina Nacional de Normalización (ONN), Vedado, La Habana, Cuba.

CUBA. 2014. NC 1049: 2014. Guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos desde

- fuentes industriales estacionarias. Oficina Nacional de Normalización (ONN), Vedado, La Habana, Cuba.
- CUBA. 2017. NC 803: 2017. 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 (ONN), Vedado, La Habana, Cuba.
- DICTUC (DIVISIÓN INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOPROCESOS). 2007. Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile, 281 p.
- DIGESA (DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD AMBIENTAL). 2005. Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Perú, Dirección General de Salud Ambiental. En sitio web: http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf.
- EASTERN RESEARCH GROUP, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1999. Handbook for Criteria Pollutant Inventory Development. A Beginner's Guide for Point and Area Sources. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, EE.UU., 285 p.
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2004. FIRE v. 6.25, emission factors from all AP42. En sitio web: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>.
- EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). 2012. Criteria Air Pollutants, NAAQS Table. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). En sitio web: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>.
- HIDALGO, E. A. 2014. Estimación de emisiones gaseosas de fuentes fijas en el sector industrial del cantón Rumiñahui. Trabajo de Grado para la obtención del Título de Ingeniera Química. Carrera de Ingeniería Química, UCE, Quito. 215 p.
- INECC. 2014. Elaboración del inventario nacional de emisiones de fuentes móviles para México 2013 y proyección 2030 mediante el modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES). Informe técnico final. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coyoacán, México, 100 p. En sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197011/2014_CGCSA_Inventario_de_emisiones_usando_MOVES_parte_1.pdf.
- MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT MANATU MO TE TAI AO. 2004. Good practice guide for atmospheric dispersion modelling. New Zealand, Ministry for the Environment Manatu Mo Te Taiao. En sitio web: <https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/atmospheric-dispersion-modelling-jun04.pdf>. ISBN: 0-478-18941-9.
- NÚÑEZ, V. 2015. Metodología de diagnóstico técnico ambiental en fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica y el impacto a la salud humana. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Química y Farmacia, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba.
- NÚÑEZ, V., Morales, M.C., Pedraza, J., *et al.* 2014. Emisiones a la atmósfera de material particulado de centrales azucareros y refinerías de azúcar en la provincia de Villa Clara, Cuba. *Revista ICIDCA*, 48 (2).
- NÚÑEZ, V., SAURA, G., RODRÍGUEZ, R., *et al.* 2018. Evaluación de la calidad del aire para los óxidos de nitrógeno, municipio Santo Domingo, provincia Villa Clara, Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 24 (sp): 365-

373.

Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable, México, 28 p.

POPE, C. A., BURNETT, R. T., THUN, P.H., MICHAEL, J. M., *et al.* 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287 (9): 1132-1141.

TRAMUTO, F., Cusimano, R., Cerame, G., *et al.* 2011. Urban air pollution and emergency room admissions for respiratory symptoms: a case-crossover study in Palermo, Italy. *Environmental Health*, 10 (31): 1-11.

SEMARNAT. 2013. Calidad del aire: una práctica de vida. Cuadernos de divulgación ambiental. Primera edición, Centro de

WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2005. WHO air quality guidelines global update. Bonn, Germany. Copenhagen, Denmark.

Recibido el 15 de diciembre de 2017 y Aceptado el 16 de abril de 2019