

Análisis meteorológico y contaminación atmosférica en escenarios de generación eléctrica distribuida en Santiago de Cuba



<https://cu-id.com/2377/v31n4e02>

Meteorological analysis and air pollution in distributed power generation scenarios in Santiago de Cuba

✉ Lisandra Zapata Despaigne*, ✉ Diamela Beatriz Ávila, ✉ Yindra Zulema Salmon Cuspinera, ✉ María Teresa Álvarez Balanqué, ✉ Yolanda Pardo Riverí, ✉ Harol Pineda Burgos

Centro Meteorológico Provincial Santiago de Cuba, Santiago de Cuba, Cuba

RESUMEN: La evaluación del impacto ambiental de la generación eléctrica distribuida en zonas urbanas es crucial para la salud pública y la gestión de la calidad del aire. Este estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre las variables meteorológicas y la distribución de grupos electrógenos de emergencia (GEE) para evaluar su impacto ambiental en Santiago de Cuba. Se emplearon series históricas (1991-2020) de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación de tres estaciones meteorológicas, procesadas con el sistema SAROM. Se analizó la base de datos de la empresa eléctrica provincial para georreferenciar 872 GEE mediante QGIS. Los resultados mostraron un incremento sostenido de la temperatura media anual (hasta 1,6 °C) y una tendencia a la reducción de la velocidad del viento en zonas urbanas, condiciones que limitan la dispersión de contaminantes. La distribución de los GEE fue muy desigual, el 55% se concentra en el municipio cabecera, con predominio de marcas como DENYO. Se concluyó que la operación de estos grupos, en un contexto de calentamiento local y condiciones meteorológicas que favorecen la estabilidad atmosférica, agrava la acumulación de emisiones y aumenta el riesgo para la salud respiratoria de la población urbana.

Palabras clave: temperatura, viento, salud pública, diésel, emisiones.

ABSTRACT: Assessing the environmental impact of distributed electricity generation in urban areas is crucial for public health and air quality management. This study aimed to analyze the relationship between meteorological variables and the distribution of emergency generator sets (EGS) to evaluate their environmental impact in Santiago de Cuba. Historical data series (1991-2020) of temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation from three meteorological stations were processed using the SAROM system. The provincial electric company's database was analyzed to georeference 872 EGS using QGIS. The results showed a sustained increase in the average annual temperature (up to 1.6 °C) and a trend toward reduced wind speed in urban areas, conditions that limit the dispersion of pollutants. The distribution of EGS was highly uneven, with 55% concentrated in the capital city, and brands such as DENYO predominating. It was concluded that the operation of these groups, in a context of local warming and meteorological conditions that favor atmospheric stability, exacerbates the accumulation of emissions and increases the risk to the respiratory health of the urban population.

Keywords: temperature, wind, public health, diesel, emissions.

INTRODUCCIÓN

En 2005, Cuba transformó su modelo eléctrico como parte de la Revolución Energética, una respuesta a la crisis sufrida el año anterior. Este cambio implicó una

migración desde un sistema centralizado hacia un esquema de generación distribuida basado en motores de combustión interna. Para ello, se instalaron grupos electrógenos en más de 200 puntos del país, una operación que posteriormente se reguló mediante normativas como la Resolución 299/2015.

*Autor para la correspondencia: zapata Despaigne Lisandra@gmail.com

Recibido: 20/10/2025

Aceptado: 14/11/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores: Conceptualización, Redacción - revisión y edición, Metodología: Lisandra Zapata Despaigne, Yindra Salmon Cuspinera, Diamela Beatriz Ávila, María Teresa Álvarez Balanqué, Yolanda Pardo Riverí, Harol Pineda Burgos. Conservación de datos, Análisis formal, Redacción - primera redacción: Lisandra Zapata Despaigne.

Investigación, Supervisión, Validación, Visualización: Lisandra Zapata Despaigne.

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/)

Los grupos electrógenos de emergencia (GEE) han resultado fundamentales para garantizar el suministro eléctrico en sectores críticos, como la salud, la industria y las zonas rurales. Sin embargo, su uso intensivo, sumado a la dependencia del diésel y el fuel oil y a la obsolescencia tecnológica, ha generado impactos ambientales significativos. Estos impactos afectan especialmente la calidad del aire y la salud pública, tal como señalan estudios como el de [Hourné-Calzada et al. \(2012\)](#).

Varias investigaciones han abordado la problemática ambiental que deriva del uso intensivo de grupos electrógenos y de tecnologías industriales obsoletas en Cuba ([Varona et al., 2007](#); [Carbonell, 2014](#); [Marrero Díaz et al., 2020](#)). Estudios específicos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2004, 2009) y de [Cuesta-Santos et al. \(2014, 2015, 2018\)](#) identificaron a Santiago de Cuba como una de las ciudades con mayores niveles de contaminación atmosférica del país. Estos trabajos informaron concentraciones elevadas de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}).

Los contaminantes mencionados se asocian principalmente a la quema de combustibles fósiles. Su acumulación en la atmósfera se ve agravada por condiciones meteorológicas adversas y por la compleja orografía montañosa que caracteriza a la región de Santiago de Cuba.

Este estudio analiza la relación entre las variables meteorológicas y la distribución de los grupos electrógenos de emergencia (GEE) en Santiago de Cuba. Su objetivo es evaluar el impacto ambiental de esta infraestructura y proponer medidas de mitigación adecuadas. La investigación se desarrolla en el marco del proyecto científico identificado con el código PS211LH004-032.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo y empleó la técnica de análisis de datos descriptiva. Su objetivo fue evaluar el impacto ambiental del funcionamiento de los grupos electrógenos de emergencia (GEE) en la provincia de Santiago de Cuba, en relación con las condiciones meteorológicas locales. Los datos meteorológicos procedieron de las estaciones de Contramaestre, Universidad y Gran Piedra, operadas por el Sistema Meteorológico Nacional Cubano.

Las series históricas de datos se extrajeron mediante el Sistema Automatizado de Registro y Observación Meteorológica (SAROM), versión 2.24. Estas series se homogenizaron posteriormente en el Centro Nacional del Clima, conforme a la norma cubana vigente para el periodo 1991-2020, establecida por la Organización Meteorológica Mundial. Para la representación gráfica de las variables se utilizaron hojas de cálculo Microsoft Excel.

En cuanto a los datos energéticos, la investigación consultó la base de datos institucional de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Generación de Emergencia, de la Empresa Eléctrica Santiago de Cuba. Esta fuente permitió identificar el total de GEE instalados, junto con sus marcas operativas, potencias nominales en kVA y su distribución por organismos del Estado. La salida cartográfica de los mapas temáticos se elaboró con el Sistema de Información Geográfica QGIS, versión 3.16.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

El análisis del comportamiento de la temperatura media anual en las tres estaciones meteorológicas de la provincia revela tendencias significativas en el régimen térmico regional durante las últimas tres décadas ([Figura 1](#)). La estación de Contramaestre registra un incremento térmico de aproximadamente 1.6 °C en el período analizado, con un aumento desde 24.5 °C en 1991 hasta 26.1 °C en 2020. Por su parte, la estación Universidad evidencia una subida constante, aunque menos abrupta, al pasar de 26.7 °C a 27.5 °C.

La estación Gran Piedra, debido a su mayor altitud, mantiene valores absolutos más bajos, pero también presenta un incremento en sus temperaturas medias anuales. Este aumento se cuantifica en un grado centígrado, al pasar de 18.6 °C a 19.6 °C en el mismo intervalo de tiempo.

Estas tendencias al calentamiento, aunque presentan magnitudes diferentes, son sostenidas en las tres localidades. El aumento ligero pero persistente de las temperaturas promedio puede influir en la dispersión vertical de los contaminantes atmosféricos. Además, puede prolongar los episodios de inversión térmica, lo que a su vez incrementa la permanencia de compuestos nocivos en las áreas urbanas.

La [figura 2](#) muestra el comportamiento de la humedad relativa en las tres estaciones. La estación de Contramaestre presenta una ligera tendencia descendente, con picos de 79 % en los años 1996 y 2007. Esta misma estación registra sus valores mínimos, de 75 %, en los años 2000, 2004, 2009 y 2020.

Por su parte, la estación Universidad mantiene una oscilación que se sitúa entre el 68 % y el 73 %, sin que se observen cambios abruptos a lo largo del periodo. En contraste, la estación Gran Piedra presenta valores más altos que las otras dos, a pesar de su altitud, con un pico máximo del 90 % en el año 2010. El comportamiento en esta estación es más estable, aunque exhibe ligeras fluctuaciones.

En conjunto, el comportamiento de la humedad relativa media anual en Santiago de Cuba muestra una variación moderada a lo largo del año. Los valores oscilan entre el 68 % y el 90 %.

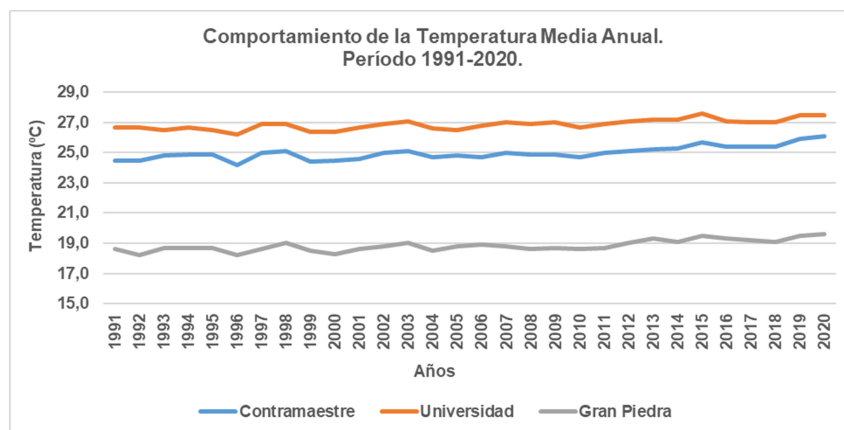


Figura 1. Comportamiento de la temperatura media anual

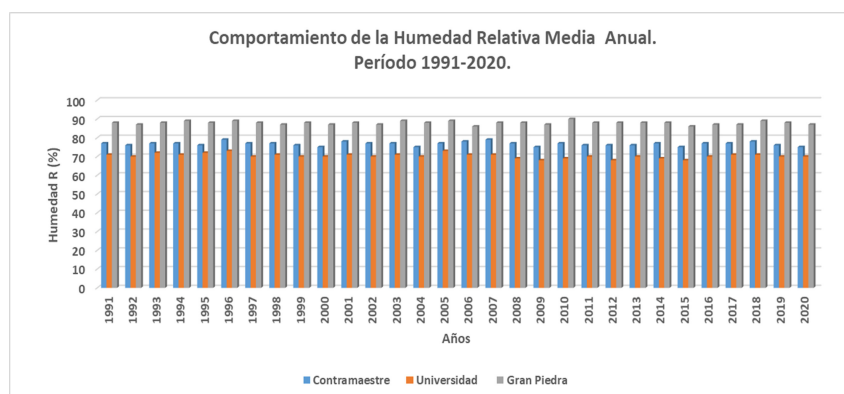


Figura 2. Comportamiento de la humedad relativa media anual

El análisis del comportamiento del viento en las estaciones muestra una variabilidad moderada en Contramaestre. Esta estación registra picos de velocidad en 2004 (10 km/h), 2011 (11.2 km/h) y 2012 (11 km/h). Los valores mínimos se observan en 1991 y 2019, con 5 km/h.

La estación Universidad presenta una tendencia ligeramente descendente a partir de su máximo registrado en 2002, que fue de 13 km/h. Esta tendencia culmina con valores más bajos, como el de 7.3 km/h alcanzado en el año 2019.

Debido a su altitud y exposición, la estación Gran Piedra mantiene valores significativamente más

altos. Alcanza velocidades de hasta 24.2 km/h en 1998 y 24.1 km/h en 2008. Estas velocidades elevadas pueden favorecer la dispersión de contaminantes, pero también indican una mayor exposición a fenómenos meteorológicos extremos.

Las velocidades más bajas registradas en Universidad y Contramaestre, en especial durante años como 2019, pueden reducir la capacidad de ventilación atmosférica. Esta condición favorece la acumulación de contaminantes que generan los grupos electrógenos y otras fuentes urbanas, como se aprecia en la [figura 3](#).

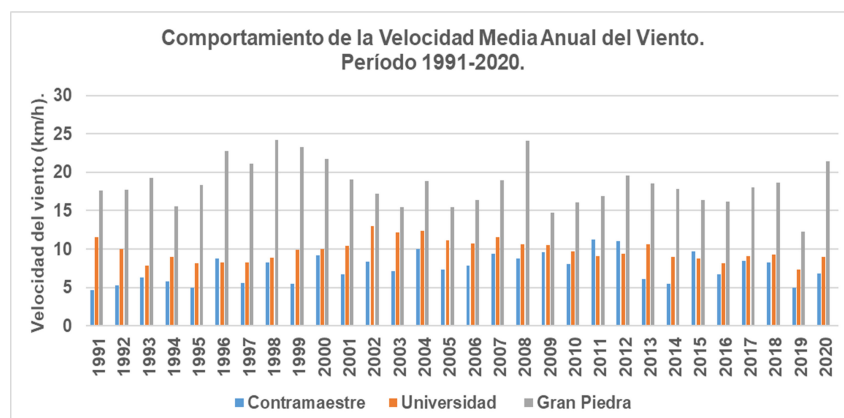


Figura 3. Comportamiento de la velocidad media anual del viento

La **figura 4** muestra una tendencia relativamente estable para Contramaestre, con fluctuaciones entre años húmedos, como 1996 y 2006, y años secos, como 2004 y 2009. Por el contrario, la serie correspondiente a la Universidad presenta una mayor irregularidad. En esta última se observan picos marcados en 1993 y 2007, así como descensos notables en los años 2000 y 2015.

La Estación de Gran Piedra registra los valores más altos y variables de la serie, lo que se atribuye a su altitud y exposición orográfica. Destacan los años 1994 y 1995 como períodos extremadamente lluviosos, con registros de 3400.8 mm y 2956.9 mm, respectivamente. Esta variabilidad climática tiene implicaciones relevantes para el estudio.

La alta humedad relativa, junto con temperaturas elevadas y una baja velocidad del viento, reduce la dispersión de los contaminantes atmosféricos. Esta situación es particularmente crítica en zonas urbanas con grupos electrógenos en operación continua. Dichos factores meteorológicos agravan los efectos de las emisiones de dióxido de nitrógeno, material

particulado y compuestos orgánicos volátiles. Como consecuencia, se potencia el impacto negativo sobre la salud respiratoria de la población expuesta.

A partir del análisis realizado con los datos suministrados por la Unidad Empresarial de Base (UEB) Generación de Emergencia de la Empresa Eléctrica Santiago de Cuba, se identificó un total de 872 grupos electrógenos de emergencia (GEE) instalados en la provincia. El municipio cabecera concentra el 55 % de las instalaciones, lo que corresponde a 478 equipos. Le siguen San Luis, con un 9 % y 79 unidades, y Songo La Maya, con un 7 % y 65 unidades. Estas tres localidades agrupan la mayor parte de los GEE en el territorio.

En contraste, el municipio de Mella presenta la menor cantidad de equipos, con 24 unidades que representan el 2 % del total. El Tercer Frente posee 29 GEE, equivalentes al 3 %, y Contramaestre registra 45 unidades, que corresponden al 5 %. Por su parte, los municipios de Guamá y Palma Soriano albergan cada uno 59 unidades, lo que representa un 7 % del total provincial, tal como se detalla en la **figura 5**.

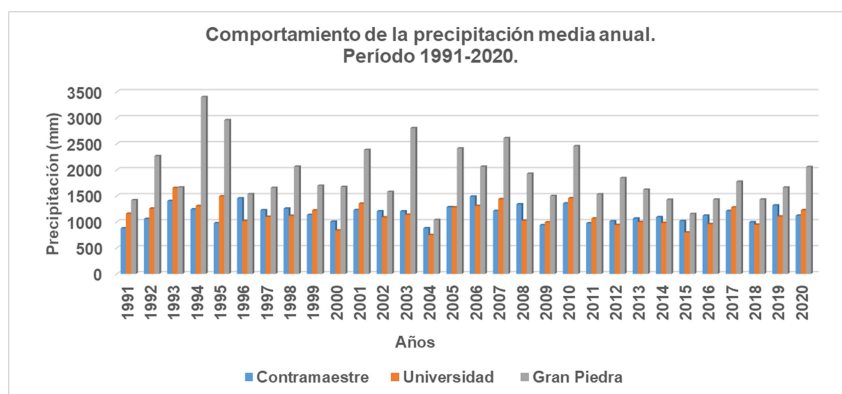


Figura 4. Comportamiento de la precipitación medio anual

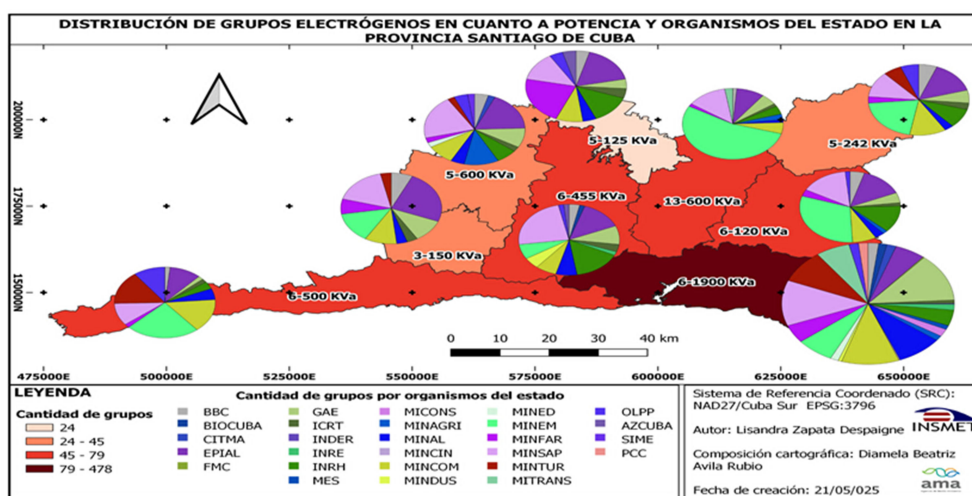


Figura 5. Distribución por municipios de los grupos electrógenos en cuanto cantidad, potencia y organismos del estado en la provincia de Santiago de Cuba

Desde el punto de vista institucional, se contabilizaron 28 organismos estatales con equipos instalados. De ellos, 26 tienen presencia en el municipio cabecera. Las entidades con mayor número de GEE son el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) con 123 unidades, de las cuales 87 se ubican en zonas remotas sin acceso al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), el Ministerio de Salud Pública (MINSAP) con 116 unidades distribuidas entre policlínicos (37), hospitales (23) y otras instituciones médicas priorizadas, y el Ministerio de Telecomunicaciones (MINCOM) con 84 GEE.

También se identificaron organismos con una presencia mínima de equipos. La Federación de Mujeres Cubanas (FMC), el Instituto Nacional de Deportes, Educación Física y Recreación (INDER), el Ministerio de Comercio Interior (MINCIN) y el Ministerio de la Industria Sideromecánica (SIME) cuentan cada uno con una sola unidad instalada, según se muestra en la [figura 5](#).

Respecto a la potencia instalada, medida en kilovoltamperios (kVA), se observa que el municipio cabecera presenta los valores más elevados. Destaca la Terminal Portuaria Multipropósito Santiago de Cuba, perteneciente al Ministerio de Transporte, la cual opera un grupo electrógeno marca HIMOINSA de 1900 kVA.

También se identificaron potencias relevantes en otras instalaciones del territorio. El Aserrío El Brujo (MINAGRI), Cereales Santiago y la Empresa Provincial Lácteo (MINAL) disponen cada uno de equipos de 1000 kVA. Los municipios de San Luis y Contramaestre registran unidades con potencias de hasta 600 kVA. Por su parte, Guamá y Palma Soriano operan grupos de 500 kVA y 455 kVA, respectivamente.

El análisis de la distribución de los grupos electrógenos de emergencia (GEE) en la provincia de Santiago de Cuba permitió identificar un total de veinte marcas diferentes que operan en el territorio

([Figura 6](#)). Entre todas ellas, la marca DENYO destaca con un predominio significativo, ya que representa el sesenta y cuatro por ciento del total de equipos instalados. Esta concentración se verifica de manera especial en el municipio cabecera, donde se contabilizan doscientas cincuenta y tres unidades, así como en los municipios de San Luis y Palma Soriano, que también presentan cifras relevantes.

Además de DENYO, se observó una participación destacada de otras marcas en el parque de equipos. La marca STEMAC constituye el nueve por ciento del total de los grupos electrógenos. Otra marca con una presencia considerable es GREYMO, la cual representa el ocho por ciento de los equipos registrados en el estudio.

Se confirma un patrón climático-ambiental complejo en Santiago de Cuba, caracterizado por el aumento sostenido de la temperatura, variaciones moderadas de humedad, disminución de la ventilación en zonas urbanas y alta variabilidad de la precipitación en áreas de montaña. Estos factores, coherentes con la literatura científica regional y global ([IPCC, 2021](#); [Seinfeld & Pandis, 2016](#)), favorecen la persistencia de contaminantes primarios y la formación secundaria de ozono y aerosoles, reforzando el marco teórico de acoplamiento clima-calidad del aire.

La diferenciación entre estaciones urbanas y de montaña subraya la importancia de las escalas meso y micro climáticas en la dispersión y deposición de contaminantes, aportando evidencia para modelos de alta resolución que integren orografía y uso del suelo ([Baklanov et al., 2014](#)). La alta densidad y potencia de grupos electrógenos de emergencia (GEE) revela una tensión entre seguridad energética y salud ambiental, comportándose como una red de fuentes puntuales cuyo impacto depende del régimen meteorológico urbano ([WHO, 2021](#); [UNEP, 2019](#)).

El estudio aporta una caracterización integral del clima y las fuentes emisoras en Santiago de Cuba, al combinar datos sobre temperatura, humedad,

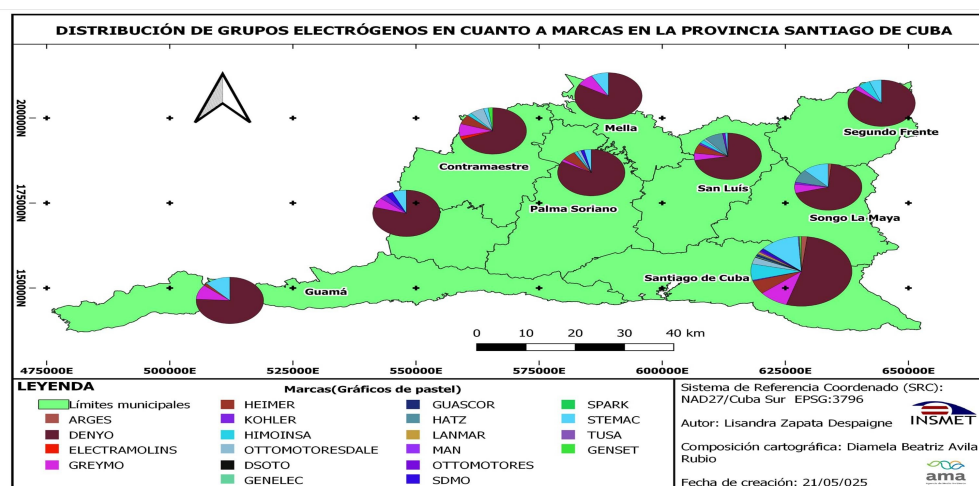


Figura 6. Distribución por municipios de los grupos electrógenos en cuanto a marca

viento y precipitación con un inventario detallado de los grupos electrógenos de emergencia instalados en la provincia. Esta integración permite diseñar estrategias de gestión adaptativa ajustadas a la realidad cubana, como la operación de los equipos en función de las condiciones meteorológicas, la incorporación de tecnologías de control de emisiones y la calibración de modelos de dispersión atmosférica con escenarios locales. De este modo, se fortalece el vínculo entre la investigación científica, la gestión ambiental y la política pública, aportando una base sólida para reducir la exposición de la población a contaminantes, mejorar la planificación energética y aumentar la resiliencia climática en un territorio tropical urbano altamente vulnerable como Santiago de Cuba.

CONCLUSIONES

La provincia experimenta un calentamiento sostenido, con aumentos de entre 1.0 °C y 1.6 °C en la temperatura media anual en las últimas tres décadas. Este incremento, más marcado en zonas de menor altitud, se combina con una ligera tendencia a la baja en la humedad relativa en algunas áreas y una reducción en la velocidad del viento, especialmente en entornos urbanos.

La conjunción de temperaturas más altas, menor humedad relativa y una velocidad del viento en descenso reduce la capacidad de dispersión atmosférica. Esta condición meteorológica favorece la acumulación de contaminantes, prolonga los episodios de inversión térmica y agrava la exposición de la población a emisiones nocivas, con especial impacto en las áreas urbanas.

La distribución de grupos electrógenos es muy desigual, el 55% se concentra en el municipio cabecera. Su operación, necesaria para suplir fallos energéticos, constituye una fuente de emisiones contaminantes localizadas que, en el contexto climático descrito, incrementa el riesgo para la salud respiratoria de la población.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baklanov, A., Grimmond, C. S. B., & Martilli, A. (2014). Atmospheric Urban Boundary Layers and Urban Meteorology. En J. Fernando (Ed.), *Handbook of Environmental Fluid Dynamics* (1.^a ed., pp. 415-438). CRC Press.
- Carbonell, L. M. T. (2014). Modelación de la contaminación atmosférica y valoración de impactos epidemiológicos y externalidades, asociadas a instalaciones energéticas e industriales [PhD Thesis]. En *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba.
- Cuesta-Santos, O., Sosa-Pérez, C., & Fonte-Hernández, A. (2015). Impacto de las emisiones industriales en la salud pública en Santiago de Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3), 45-52.
- Cuesta-Santos, O., Sosa-Pérez, C., & Fonte-Hernández, A. (2018). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(2), 178-190.
- Cuesta-Santos, O., Sosa-Pérez, C., Iraola-Ramírez, C., & González-Jaime, Y. (2014). *Evaluación de la calidad del aire en zonas urbanas de Santiago de Cuba* [Technical Report]. Instituto de Meteorología, Cuba.
- Hourné-Calzada, M. B., Brito-Vallina, M. L., del Castillo-Serpa, A. M., Fraga-Guerra, E., & Díaz-Concepción, A. (2012). Análisis de criticidad de grupos electrógenos de la tecnología fuel oil en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 55-61.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge University Press.
- Marrero Díaz, Y., Cruz Estopiñán, E. B., & Reyes Mesa, A. (2020). Evaluación de las emisiones atmosféricas provenientes de grupos electrógenos en la provincia de Holguín, Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(4).
- PNUMA. (2004). *Evaluación ambiental de Santiago de Cuba* (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) [Report]. PNUMA.
- PNUMA. (2009). *Informe de seguimiento ambiental en Santiago de Cuba* (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) [Report]. PNUMA.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3.^a ed.). Wiley.
- UNEP. (2019). *Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions*. United Nations Environment Programme.
- Varona, M., Arocha, A., Esquivel, E., & Roche, R. (2007). Grupos electrógenos y su impacto ambiental. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 9(7), 217-221.
- WHO. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization.