

Contaminantes atmosféricos en La Habana durante 2021

Atmospheric pollutants in Havana during 2021



<https://cu-id.com/2377/v30n3e06>

✉Ignavis de la Caridad Castillo Lemus*, ✉Arnaldo Evaristo Collazo Aranda,
✉Rosemary López Lee, ✉Rachel Martínez Rodríguez

Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

RESUMEN: En Cuba, la falta de equipos de medición, el alto costo de las estaciones de contaminación atmosférica y las limitantes para acceder a nuevas tecnologías, dificultan el monitoreo continuo de la calidad del aire. Por tales motivos, la presente investigación tuvo como objetivo, caracterizar contaminantes criterio empleando el modelo *System for Integrated modeling of Atmospheric composition*. Se obtuvo una serie diaria de concentraciones estimadas de contaminantes criterio en La Habana durante el año 2021. Se realizó una caracterización del comportamiento de los contaminantes analizando las concentraciones medias diarias y medias mensuales. Se realizó una revisión de los días en que las concentraciones sobrepasaban los valores de las concentraciones máximas admisibles establecidas en la Norma Cubana. Además, se compararon estos resultados con los Valores Guías de Calidad del Aire recomendados por la Organización Mundial de la Salud. De forma general, los valores diarios estimados de las concentraciones de los contaminantes se correspondieron con los patrones de distribución espacial y temporal característicos observados en estudios precedentes en la ciudad con monitoreo automático y activo. Se reafirma así la utilidad de la herramienta de las salidas del modelo *System for Integrated modeling of Atmospheric composition* para brindar información de calidad del aire en La Habana.

Palabras clave: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico, System for Integrated modeling of Atmospheric composition.

ABSTRACT: In Cuba, the lack of measurement equipment, the high cost of air pollution stations and the limitations to access new technologies make continuous monitoring of air quality difficult. For these reasons, the objective of this research was to characterize criterion pollutants using the System for Integrated modeling of Atmospheric composition model. A daily series of estimated concentrations of criteria pollutants was obtained in Havana during the year 2021. A characterization of the behavior of the pollutants was carried out by analyzing the average daily and average monthly concentrations. A review was carried out of the days in which concentrations exceeded the values of the maximum admissible concentrations established in the Cuban Standard. In addition, these results were compared with the Air Quality Guide Values recommended by the World Health Organization. In general, the estimated daily values of pollutant concentrations corresponded to the characteristic spatial and temporal distribution patterns observed in previous studies in the city with automatic and active monitoring. Thus, the usefulness of the tool of the outputs of the System for Integrated modeling of Atmospheric composition model to provide air quality information in Havana is reaffirmed.

Key words: sulfur dioxide, nitrogen dioxide, tropospheric ozone, System for Integrated modeling of Atmospheric composition.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la contaminación atmosférica representa un aspecto fundamental para mejorar la calidad del aire ya que, lo que no se mide, no se puede mejorar. En la actualidad el grado de contaminación de la atmósfera puede determinarse utilizando diversas herramientas y métodos. Pueden realizarse tanto

mediciones directas procedentes de estaciones de calidad del aire, como notificaciones desde las propias fuentes. Además, existen modelos que pueden considerar diversas fuentes de información. Todo esto, unido a consideraciones de clima, topografía y patrones de dispersión, permiten comprender, monitorear y/o estimar el comportamiento de los contaminantes emitidos (ENVIRA IoT, 2020).

*Autor para correspondencia: Ignavis de la Caridad Castillo Lemus. E-mail: Ignavis@gmail.com

Recibido: 18/03/2024

Aceptado: 23/04/2024

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización del estudio.

Contribución de los autores: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

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/)

Para el caso específico de Cuba, la falta de equipos de medición, el alto costo de las estaciones de contaminación atmosférica y las limitantes para acceder a nuevas tecnologías, dificultan el monitoreo continuo de la calidad del aire. Por tales motivos se hace necesario buscar nuevas herramientas que permitan fortalecer el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. Tal es el caso del *System for Integrated modeling of Atmospheric composition (SILAM)*, empleado actualmente en el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera (CECONT) del Instituto de Meteorología (INSMET).

SILAM es un modelo de dispersión atmosférica de escala global a meso desarrollado por el Instituto Meteorológico de Finlandia (*FMI*) ([Sofiev et al., 2006](#)). Este sistema, perteneciente al programa *Copernicus*, proporciona información sobre la composición atmosférica, la calidad del aire y el humo de los incendios forestales y también puede resolver el problema de la dispersión inversa. Puede tomar datos de una variedad de fuentes, incluidas las naturales como la sal marina, el polvo y el polen ([Martínez, 2022](#)).

El monitoreo continuo y sistemático de la contaminación del aire, proporciona información a los gobiernos sobre la calidad del aire. Esto permite el análisis del cumplimiento de estándares y la adopción de medidas orientadas a minimizar los efectos perjudiciales. Resulta por tanto de gran importancia y permite hacer un análisis basado en el grado de concentración de los contaminantes, independientemente de la magnitud de las emisiones. Por tales motivos, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar los contaminantes criterio empleando el modelo *SILAM* para brindar información de calidad del aire en La Habana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los contaminantes criterios considerados en la investigación fueron Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Ozono troposférico (O₃).

Fue seleccionada La Habana como área de estudio teniendo en cuenta diversos criterios de interés científico, como fueron:

- Es una de las ciudades más afectadas por la contaminación atmosférica en Cuba, al ser la más poblada y contar con el mayor centro industrial y portuario del país ([Cuesta et al., 2019](#)).
- Existencia de un inventario de las principales fuentes fijas de contaminación atmosférica ([Cuesta et al., 2018](#)).
- Existencia de estudios sobre el pronóstico de dispersión de contaminantes, utilizando el sistema de modelos AERMOD, a partir de las emisiones provenientes de las fuentes fijas de la ciudad ([Cuesta et al., 2014 y 2018](#)).

- Existencia de diversos estudios sobre la contaminación atmosférica en toda la provincia ([Vidal, 2017](#); [Cuesta et al., 2019](#); [De la Rosa, 2020](#); [Reyes, 2022](#)).
- Existencia de datos provenientes de estaciones terrestre de monitoreo de la calidad del aire para distintos períodos de tiempo.

El estudio y análisis de esta gran diversidad de antecedentes permitió estimar de modo subjetivo si las salidas del modelo *SILAM* reflejaban de forma acertada lo que sucede en superficie con los contaminantes criterio.

Procesamiento de las salidas del modelo SILAM

El *FMI* proporciona tres conjuntos de datos basados en *SILAM*: un pronóstico de contaminantes atmosféricos globales de 4 días (SO₂, NO, NO₂, O₃, PM_{2.5} y PM₁₀) basado en *TNO-MACC* (emisión global) e *IS4FIRES* (incendios forestales), un pronóstico mundial de humo de incendios forestales de un día basado en *IS4FIRES* y un pronóstico de polen de 5 días para Europa ([FMI, 2022](#)).

Para esta investigación se descargaron los archivos (en formato *NetCDF*), provenientes del modelo *SILAM* correspondientes al área de estudio. Posteriormente se procedió a extraer los valores de las concentraciones del contaminante en cuestión: promedio diario (*cnc_mean_day*) y máximo en 8 horas para el caso del O₃ y 24 horas para el SO₂ y el NO₂ (*cnc_max_day_*) en el área de estudio utilizando un Script de *python* sobre *Linux Ubuntu*. Por último, se procedió a manejar la información utilizando *Microsoft Excel* sobre *Windows* y se obtuvo la serie diaria de las concentraciones de SO₂, NO₂ y O₃, para La Habana desde enero a diciembre del 2021.

Los valores de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos del modelo *SILAM* en la Habana fueron desagregados para 4 zonas que agrupan los 15 municipios de la capital ([figura 1](#)). Cada zona quedó estructurada de la siguiente forma: Zona 1 (Habana del Este y Guanabacoa), Zona 2 (Diez de Octubre, Regla, Habana Vieja, Centro Habana y San Miguel del Padrón), Zona 3 (Playa, Plaza de la Revolución, Boyeros, La Lisa, Marianao y El Cerro) y Zona 4 (Arroyo Naranjo y Cotorro).

A partir de la base de datos confeccionada, se realizó una caracterización del comportamiento de los contaminantes SO₂, NO₂ y O₃. Se analizó el comportamiento de las concentraciones medias diarias y medias mensuales. Se realizó una revisión de los días en que las concentraciones de contaminantes sobrepasaban los valores de las concentraciones máximas admisibles (CMA) establecidas en la Norma Cubana vigente (NC 1020:2014). Se compararon estos resultados con los valores guías de calidad del aire (GCA) recomendados por la OMS en 2021 ([tabla 1](#)).

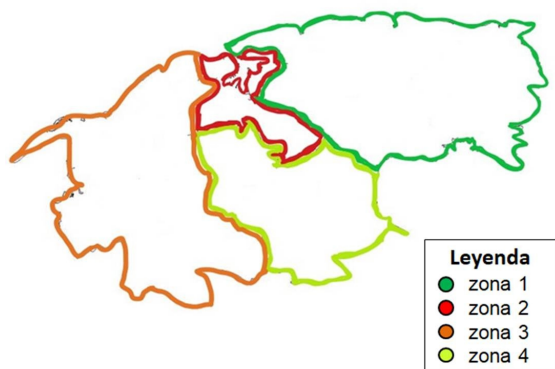


Figura 1. Zonas de La Habana cubiertas por el modelo SILAM

Para evaluar el nivel de contaminación atmosférica se utilizó el Índice de Calidad del Aire (ICA), como aparece en la NC 111:2004, equivalente al cociente de la concentración determinada para el contaminante y la CMA. En este caso se evaluaron diferentes contaminantes, por lo tanto, se determinó el ICA como el mayor de los subíndices obtenidos.

En la tabla 2 se muestran las categorías del ICA, con las indicaciones correspondientes a cada una de

estas y las implicaciones que pueden tener en la salud. En esta investigación se estableció la evaluación del ICA de cada contaminante para un periodo de tiempo diario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del comportamiento del SO₂ en La Habana según las estimaciones del modelo SILAM

La figura 2 muestra el comportamiento del SO₂ en la provincia de La Habana durante el año 2021 utilizando las estimaciones del modelo SILAM. El valor medio en la ciudad fue de 14 µg/m³. Las zonas 2 y 3 reportaron los valores promedio más altos, alcanzando máximos de 31 µg/m³ en la zona 2 durante el mes de junio, y de 28 µg/m³ en la zona 3 durante el mes de septiembre. En las zonas 1 y 4 las concentraciones medias se comportaron entre 3 y hasta 4 veces por debajo de las reportadas en las zonas 2 y 3. Los meses con mayor valor promedio de SO₂ para estas zonas fueron: junio, septiembre y octubre, cuando ambas zonas (1 y 4) alcanzaron un promedio de 10 µg/m³.

Tabla 1. Concentraciones Máximas Admisibles (CMA) y Guías de Calidad (GCA)

Contaminante	CMA (ug/m ³)	GCA (ug/m ³)
Ozono (O ₃) /8 horas	100	100
Dióxido de nitrógeno (NO ₂) /24 horas	40	25
Dióxido de azufre (SO ₂) /24 horas	45	40

Fuente: Norma Cubana (NC) 1020:2014 y OMS, (2021)

Tabla 2. Índice de Calidad del Aire (ICA)

Índice	Categoría	Comentarios
0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la CMA prescrito en la NC 1020:2014. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
80 - 99	Aceptable	No supera el 99 % de la CMA. Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones.
100-199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la CMA prescrito en la NC 1020:2014. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
200-299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 - 300 %) el valor de la CMA. Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una SITUACIÓN DE ATENCIÓN .
300-499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la CMA. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una SITUACIÓN DE ALERTA .
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la CMA, dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL .

Fuente: Norma Cubana (NC) 111:2004

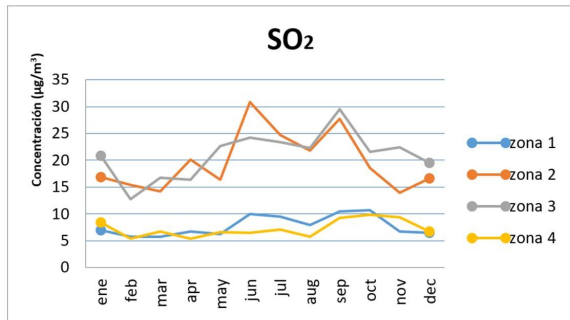


Figura 2. Marcha anual del SO₂ en La Habana (2021) estimado por el Modelo SILAM

Los resultados coinciden con estudios precedentes que identifican las zonas más comprometidas con el deterioro de la calidad del aire alrededor de la bahía de La Habana, producto de la refinería de petróleo, el grupo electrógeno de Regla y de la central termoeléctrica (CTE) de Tallapiedra (Preval, 2012; Cremata, 2018; López *et al.*, 2018). Además, los municipios de Regla, Habana Vieja, La Lisa y el Cerro encabezan la lista de emisores de SO₂ en la provincia (Cuesta *et al.*, 2019).

El SO₂ es un contaminante emitido directamente por fuentes de combustión de combustibles fósiles locales, por lo cual su concentración espacial y temporal está fuertemente determinada por la distribución espacial de las fuentes y su patrón de operación (diario o estacional). Este factor determina el aumento de las concentraciones en las zonas 2 y 3, dentro de las cuales se encuentran ubicados los cuatro municipios antes mencionados. Por otro lado, existen diferencias en cuanto a la circulación de medios de transporte que pudieron influir también en el comportamiento de las concentraciones de SO₂ y a la presencia de grupos electrógenos de régimen de trabajo continuo, ya que este compuesto gaseoso deriva de la quema de combustibles fósiles (Vidal, 2017).

Las zonas 1 y 4 incluye municipios como Habana del Este, Arroyo Naranjo y el Cotorro que se encuentran más alejados del centro de la ciudad. En los mismos, la densidad del flujo vehicular es menor, en comparación con municipios como Centro Habana y La Habana Vieja. Además, las zonas 1 y 4 cuentan con mayores volúmenes de vegetación. Tales condiciones pudieron influir en la mejora de la calidad del aire en estas zonas.

En la tabla 3 se observa que junio fue el mes con mayor cantidad de días que se superó la CMA de SO₂ de la NC 1020:2014 en el año 2021. La zona 2 fue la de mayor incidencia, al incumplir la CMA en 23 días, alcanzando el valor máximo de 75.8 µg/m³ el día 9 de septiembre, el cual representa un valor del ICA catalogado de “Deficiente”. La zona 3 incumplió con la CMA en un total de 6 días y el valor promedio máximo fue de 52.6 µg/m³ reportado el 2 de julio, el cual representa un valor del ICA catalogado de “Deficiente”.

Las concentraciones de SO₂ en las zonas 1 y 4 se mantuvieron por debajo de las CMA durante todos los días del año. Los valores máximos fueron de 32.7 y 32.1 µg/m³ respectivamente, lo cual representa un valor del ICA catalogado de “Buena”.

Si se compara con los valores GCA recomendados por la OMS las zonas 1 y 4 continúan dentro de los parámetros admisibles, mientras que en las zonas 2 y 3 el número de días que incumplen asciende a 33 y 13, respectivamente (tabla 4).

Caracterización del comportamiento del NO₂ en La Habana según las estimaciones del modelo SILAM

El NO₂ tuvo un comportamiento similar al SO₂, pero reportó valores medios de concentración más bajos, coincidiendo con los resultados de Cuesta *et al.*, (2018). El valor medio en la provincia fue de 5 µg/m³. Las zonas 2 y 3 reportaron los mayores

Tabla 3. Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el SO₂ en La Habana (2021) según la NC 1020:2014

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)
Enero	0	19.9	0	42.1	0	35.8	0	17.1
febrero	0	19.6	0	44.9	1	47.9	0	21.5
Marzo	0	27.1	0	39.0	0	43.8	0	17.8
Abril	0	16.6	1	51.1	0	34.9	0	15.7
Mayo	0	13.1	0	42.8	0	42.1	0	19.7
Junio	0	20.7	8	58.7	1	45.8	0	13.7
Julio	0	32.7	5	75.1	1	52.6	0	32.1
agosto	0	15.5	3	51.1	0	37.8	0	13.4
septiembre	0	21.3	3	75.8	2	51.6	0	20.7
octubre	0	37.7	1	66.8	1	49.0	0	27.8
noviembre	0	29.9	2	60.7	0	44.8	0	21.6
diciembre	0	18.1	0	39.3	0	37.1	0	18.1
total	0	-	23	-	6	-	0	-

valores promedio, alcanzando los 10 µg/m³ en la zona 2 durante el mes de junio, y los 11 µg/m³ en la zona 3 durante el mes de septiembre (figura 3).

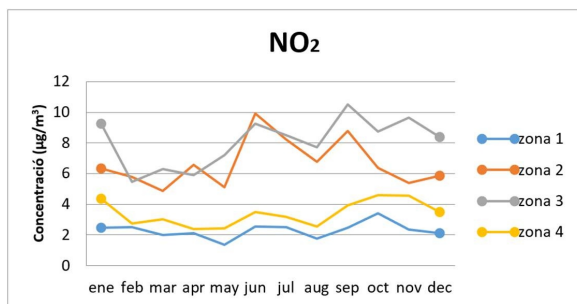


Figura 3. Marcha anual del NO₂ en La Habana (2021) estimado por el Modelo SILAM

En las zonas 1 y 4 las concentraciones medias se comportaron entre dos y hasta cuatro veces por debajo de las reportadas en las zonas 2 y 3. Los meses de mayor valor promedio en la zona 1 fueron febrero, junio, julio y octubre, cuando el contaminante alcanzó los 3 µg/m³. En la zona 4 el valor más elevado fue 5 µg/m³, alcanzado en octubre y noviembre.

El aumento relativo de las concentraciones medias en las zonas 2 y 3 pudo deberse a las emisiones provenientes de municipios como Boyeros, Marianao y Regla, que constituyen grandes emisores de NO₂ (Cuesta *et al.*, 2019). Además de la refinera y los grupos electrógenos, las fuentes móviles constituyen también grandes emisoras de NO₂ lo cual condiciona que este contaminante predomine en avenidas de la ciudad, en las zonas de mayor densidad de población (Cuesta *et al.*, 2017 y Madrazo *et al.*, 2019). No obstante, los valores medios reportados son inferiores a la CMA de la NC:1020.2014.

Las bajas concentraciones del contaminante en las zonas 1 y 4, se corresponden con el menor número de fuentes de combustión fijas y flujo vehicular explicadas con anterioridad para el caso del SO₂.

Al comparar con la NC: 1020:2014, el contaminante NO₂ no sobrepasó la CMA ningún día del 2021. Los valores GCA recomendados por la OMS solo fueron sobrepasados en una ocasión (tabla 5), el día 2 de julio, alcanzando los 33.4 µg/m³ en la zona 2 y los 25 µg/m³ en la zona 3.

Tabla 4. Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el SO₂ La Habana (2021) según las GCA de la OMS (2021)

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)
enero	0	19.9	3	42.1	0	35.8	0	17.1
febrero	0	19.6	1	44.9	1	47.9	0	21.5
marzo	0	27.1	0	39.1	1	43.8	0	17.8
abril	0	16.6	1	51.1	0	34.9	0	15.7
mayo	0	13.1	1	42.8	1	42.1	0	19.7
junio	0	20.7	9	58.7	1	45.8	0	13.7
julio	0	32.7	5	75.1	3	52.6	0	32.1
agosto	0	15.5	4	51.1	0	37.8	0	13.4
septiembre	0	21.28	5	75.8	4	51.6	0	20.7
octubre	0	37.7	2	66.8	1	49.0	0	27.8
noviembre	0	29.9	2	60.7	1	44.8	0	21.6
diciembre	0	18.1	0	39.3	0	37.1	0	18.1
total	0	-	33	-	13	-	0	-

Tabla 5. Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el NO₂ en La Habana según las GCA de la OMS (2021)

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)
enero	0	7.3	0	15.6	0	21.4	0	10.7
febrero	0	9.6	0	19.1	0	21.1	0	9.8
marzo	0	10.5	0	12.1	0	15.5	0	9.0
abril	0	6.2	0	15.4	0	12.7	0	7.1
mayo	0	3.9	0	13.7	0	14.2	0	5.8
junio	0	5.9	0	20.3	0	17.0	0	6.3
julio	0	17.5	1	33.4	1	25.5	0	14.9
agosto	0	4.9	0	17.6	0	13.4	0	4.4
septiembre	0	5.9	0	21.9	0	17.1	0	7.8
octubre	0	17.8	0	16.6	0	17.8	0	18.0
noviembre	0	10.0	0	23.8	0	22.9	0	11.4
diciembre	0	8.7	0	16.0	0	17.6	0	7.8
total	0	-	1	-	1	-	0	-

Caracterización del comportamiento del O₃ en La Habana según las estimaciones del modelo SILAM

La figura 4 se observa el comportamiento del O₃. La producción de O₃ es el resultado de reacciones fotoquímicas en la atmósfera (Martínez, 2022). Es por ello que este contaminante presenta una distribución estacional, que depende en menor medida de las características y las fuentes de emisión de cada una de las zonas.

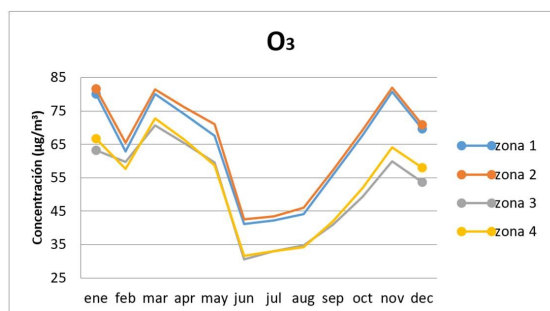


Figura 4. Marcha anual del O₃ en La Habana (2021) según estimaciones del Modelo SILAM

Durante el año 2021 el contaminante tuvo un valor medio de 59 µg/m³. Los valores promedio máximo en la zona 1 fueron de 81 µg/m³, en el mes de noviembre. En la zona 2 fueron de 82 µg/m³ durante los meses de enero y noviembre; mientras para las zonas 3 y 4 se obtuvieron los valores promedio máximo de 71 µg/m³ y 73 µg/m³ respectivamente en el mes de marzo.

En todos los casos se superan los valores promedio de O₃ para países insulares pequeños que oscilan entre 30 y 50 µg/m³ (OMS, 2021). Estos meses coinciden con el período poco lluvioso en Cuba y la influencia de Anticiclones continentales y sistemas frontales. Los valores medios mensuales más bajos se exhibieron en los meses de mayo a octubre, coincidiendo con el período lluvioso.

El comportamiento descrito del O₃ troposférico es resultado del aporte local de sus precursores (Compuestos Orgánicos Volátiles y Óxidos de Nitrógeno), así como de su transporte a largas

distancias por las masas de aire procedentes de Norteamérica que favorecen el incremento de la formación de este contaminante secundario. Esta marcha estacional de las concentraciones de O₃ también ha sido reportada por otros autores, en la Florida y en África (Ramírez, 1989) y en Cuba (López et al., 2018; Martínez, 2022).

Al analizar el comportamiento diario de las concentraciones medias de O₃, se observó que marzo fue el mes que reportó el mayor número de días que incumplió con la CMA para 8 horas establecida en la NC: 1020:2014 (tabla 6). En las zonas 1 y 2 se registró el mayor número de casos de días que incumplieron la CMA, con un total de 30 días y 33 días respectivamente. En la zona 3 las concentraciones sobrepasaron el valor establecido en 8 ocasiones y en la zona 4 en 10 ocasiones.

El día 3 de abril se alcanzaron los mayores valores medios de O₃ reportados en La Habana en el 2021, alcanzando los 120.1 µg/m³ en las zonas 1 y 2, y los valores de 113.7 µg/m³ y 115.2 µg/m³ en las zonas 3 y 4 respectivamente. Lo cual representa un valor del ICA catalogado de “Deficiente” para todas las zonas. No se comparó con los valores guías recomendados por la OMS debido a que el valor establecido en la actualización de 2021 coincide con el valor que exige la NC 1020:2014.

En resumen, se observó que la zona 2 fue donde se alcanzaron los valores de concentraciones máximos para todos los contaminantes atmosféricos criterios estudiados: SO₂, NO₂ y O₃, así como donde mayor cantidad de días se superó la CMA de estos contaminantes según la NC 1020:2014 para el año 2021.

La zona 3 le siguió a la zona 2 con los valores de concentraciones máximos de estos contaminantes y mayor número de casos en que se superan las CMA con excepción del O₃. En contraste, la zona 1 y 4 fue donde se observaron los valores promedios mínimos de estos contaminantes en La Habana, con excepción del O₃ para la zona 1, que fue la segunda zona con mayor número de casos que supero las CMA de la NC 1020:2014.

Tabla 6. Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el O₃ en La Habana (2021) según la NC 1020:2014

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m ³)
enero	5	108.4	4	108.7	0	95.1	0	97.3
febrero	3	109.1	3	108.7	1	100.1	1	101.2
marzo	9	118.0	10	117.3	5	107.1	6	109.8
abril	4	120.9	6	120.9	2	113.7	2	115.2
mayo	1	103.0	1	103.4	0	93.7	0	95.5
junio	0	52.2	0	73.5	0	48.5	0	44.9
julio	0	61.5	0	68.1	0	51.7	0	59.0
agosto	0	58.8	0	68.8	0	51.0	0	49.5
septiembre	1	114.4	1	113.0	0	74.0	0	83.7
octubre	4	112.7	6	112.3	0	98.0	1	101.2
noviembre	2	106.9	2	108.0	0	97.6	0	99.8
diciembre	1	100.1	0	98.7	0	78.9	0	81.4
total	30	-	33	-	8	-	10	-

CONCLUSIONES

Se reafirma la utilidad de la herramienta de las salidas del modelo SILAM para brindar información de calidad del aire en La Habana. Los valores diarios de las concentraciones de los contaminantes se correspondieron con los patrones de distribución espacial y temporal característicos observados en estudios precedentes en la ciudad con monitoreo automático y activo. Se observó que la zona 2, que incluye los municipios de Diez de Octubre, Regla, Habana Vieja, Centro Habana y San Miguel del Padrón, fue donde se alcanzaron los valores de concentraciones máximos para todos los contaminantes atmosféricos estudiados.

REFERENCIAS

- Cremata, L. (2018). Evaluación económica - ambiental de sistemas de captura de gases en pequeñas centrales termoeléctricas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, (UH). Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Ciencias de la Gestión Ambiental.
- Cuesta, O., Collazo, A., González, Y., Fonseca, M., Carla, A., Rodríguez, Y. (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: Instituto de Meteorología; 2014.
- Cuesta, O., Sosa, C., Iraola, C., González, Y., Núñez, V., Fonte, A. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. Rev. Cubana de Meteorología [Internet]. 2017 [citado 6 Mar 2019]; 23(2): [aprox. 3 p.]. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/238>
- Cuesta, O., Bolufé, J., Sosa, C., Carrillo, E.R., Madrazo, J. (2018). Contaminación atmosférica por fuentes móviles en la calle Reina, La Habana. Revista Cubana de Meteorología, Vol.23, No.1, pp.78-88, 2017, ISSN: 0864-151X.
- Cuesta, O., González, Y., Sosa, C., López, R., Bolufé, J., Reyes, F. (2019). La calidad del aire en La Habana. Actualidad. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 25, No. 3, septiembre-diciembre 2019, ISSN: 26640880.
- De la Rosa, A. (2020). Incidencia de los tipos de situaciones sinópticas y el polvo del Sahara en las concentraciones de material particulado en dos localidades de La Habana. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana.
- ENVIRA IoT, (2020). Cómo se mide la contaminación del aire. Consultado en: <https://enviraiot.es/como-se-mide-la-contaminacion-del-aire/>
- FMI (2022). Instituto Meteorológico e Hidrológico de Finlandia. Sistema de modelado integrado de composición atmosférica (*SystemIntegrated of modeLingforAtmosphericComposition*) (SILAM). Consultado en: <https://silam.fmi.fi>
- López, R., Bolufé, J., Sosa, C., García, E., Manso, R., Cuesta, O., Iraola, C. (2018). Evaluación de riesgos para la salud humana y la vegetación por los contaminantes atmosféricos SO₂, NO₂, PM₁₀ y O₃ en áreas de Cuba. Informe científico técnico. La Habana: Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.
- Madrazo, J., Clappier, A., Cuesta, O., Belalcazar, L. C. (2019). Evidence of traffic-generated air pollution in Havana. Revista Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera 32(1), 15-24 (2019) doi: <http://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.01.02>
- Martínez, R. (2022). Evaluación del impacto del ozono troposférico en el cultivo de la papa y en las enfermedades respiratorias crónicas en San José de las Lajas bajo influencia de condiciones meteorológicas tipos. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana.
- Mojena, E., Ortega, A. y Casielles, E.F. (2019). Las Nubes de polvo del Sahara como modulador del tiempo, el clima y la calidad del aire. Sus impactos en el medio ambiente. Memorias del CONTAT. Instituto de Meteorología.
- Oficina Nacional de Normalización de Cuba (2004). Norma Cubana NC 111:2004. Calidad del aire: Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. La Habana: ONN; 2004.
- Oficina Nacional de Normalización de Cuba (2014). Norma Cubana 1020: 2014. Calidad del aire - Contaminantes - Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. La Habana: ONN; 2014.
- OMS (2021). Guías actualizadas de la OMS sobre la calidad del aire y sus implicancias para los países latinoamericanos. Consultado en www.saludsindanio.org/nfo@saludsindanio.org
- Preval, E. (2012): Estimación y modelación de las emisiones generadas en las calderas de la Refinería Níco López. Tesis de Diploma para el título de Ingeniero Químico. Pp. 66, Universidad de La Habana, MES, La Habana.
- Ramírez, J. (1989). Estudio de las variaciones en las concentraciones de ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos. Tesis de Doctorado en Ciencias Geográficas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba, 100p.

- Reyes, F. (2022). Caracterización de los contaminantes atmosféricos en zonas de 2 municipios de La Habana. 2015–2017. Tesis para optar por el título de Máster en Salud Ambiental. Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología.
- Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M. y Kukkonen, J. (2006). Un sistema de modelado de dispersión *SILAM* y su evaluación frente a datos ETEX. *Atmos. Environment*. 40 (4): 674–685. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.069>.
- Vidal, I. (2017). Influencia de condiciones meteorológicas en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana. Cuba.

MSc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda. Universidad de La Habana, La Habana Cuba. E-mail: acollazo40@gmail.com

Dra. Rosemary López Lee. Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. E-mail: rosemary.lopez@insmet.cu

Lic. Rachel Martínez Rodríguez. Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. E-mail: victoria20plus@gmail.com