

Condiciones de poca dispersión de contaminantes atmosféricos en La Habana, Cuba



Low dispersion conditions of atmospheric pollutants in Havana, Cuba

<https://cu-id.com/2377/v30n2e03>

 Osvaldo Cuesta Santos*,  Rosemary López Lee, Amanda de la Rosa González,
 Arnaldo Collazo Aranda, Evelio García Rodríguez

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Se evalúa la influencia de las variables meteorológicas y los tipos de situaciones sinópticas (TSS) en condiciones de poca dispersión sobre las concentraciones de los contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) en el Campus del Instituto Superior de Ciencias Aplicadas (InSTEC) de la Universidad de La Habana y en la localidad de San Miguel del Padrón (SMP) durante el periodo de 2015 al 2017 a través de las mediciones realizadas en las estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire. La situación sinóptica que contribuyó de forma predominante a la ocurrencia de condiciones de poca dispersión fue la TSS VIII (Anticiclón Continental Migratorio) y el segundo lugar la TSS I (Anticiclón del Atlántico). Las muestras horarias que estuvieron por encima de la concentración máxima admisible (CMA) según la NC 1020:2014 fueron 59 y 31 veces para el PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ respectivamente, en la localidad de SMP. Por otro lado, en el InSTEC, el PM_{10} sobrepasó la CMA diaria en 21 ocasiones. Para el caso del $\text{PM}_{2.5}$ fueron sobrepasadas la CMA en 17 veces. El único evento catalogado como episodio extremo de altas concentraciones (SMOG) se desarrolló en la estación de monitoreo de la calidad del aire de SMP durante el día 15 de marzo de 2016. Los demás contaminantes gaseosos sobrepasaron sus respectivas CMA en pocas ocasiones para muestras horarias y diarias y coincidieron en tiempo con las ocurridas para el material particulado. Estas situaciones sinópticas que producen poca dispersión también pueden provocar efectos nocivos sobre la salud humana.

Palabras claves: contaminantes atmosféricos, patrones sinópticos, La Habana.

ABSTRACT: The influence of the meteorological variables and the types of synoptic situations (TSS) in low dispersion conditions on the concentrations of atmospheric pollutants (SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$) in the Campus of the Higher Institute of Sciences Applied (InSTEC) of Havana University and in the town of San Miguel del Padrón (SMP) is evaluated during the period from 2015 to 2017 through the measurements made in the automatic air quality monitoring stations. The synoptic situation that contributed predominantly to the occurrence of low dispersion conditions was TSS VIII (Migratory Continental Anticyclone) and the second place was TSS I (Atlantic Anticyclone). The hourly samples that were above the maximum admissible concentration (CMA) according to NC 1020:2014 were 59 and 31 times for PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ respectively, in the SMP locality. On the other hand, in InSTEC, PM_{10} exceeded the daily CMA on 21 occasions. In the case of $\text{PM}_{2.5}$, the CMA was exceeded 17 times. The only event classified as an extreme episode of high concentrations (SMOG) took place at the SMP air quality monitoring station on March 15, 2016. The other gaseous pollutants exceeded their respective CMA on a few occasions for hourly and daily samples and coincided in time with those that occurred for particulate matter. These synoptic situations that produce low dispersion can also cause harmful effects on human health.

Keywords: air pollutants, synoptic patterns, Havana.

*Autor para correspondencia: Osvaldo Cuesta Santos. E-mail: cuestaosvaldo52@gmail.com

Recibido: 12/10/2023

Aceptado: 06/01/2024

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Osvaldo Cuesta Santos. **Curación de datos:** Osvaldo Cuesta Santos, Rosemary López Lee, Amanda de la Rosa González, Arnaldo Collazo Aranda, Evelio García Rodríguez. **Análisis formal:** Osvaldo Cuesta Santos, Rosemary López Lee, Amanda de la Rosa González, Arnaldo Collazo Aranda, Evelio García Rodríguez. **Adquisición de fondos:** Osvaldo Cuesta Santos. **Metodología:** Osvaldo Cuesta Santos. **Supervisión:** Osvaldo Cuesta Santos. **Validación:** Osvaldo Cuesta Santos, Rosemary López Lee, Amanda de la Rosa González, Arnaldo Collazo Aranda, Evelio García Rodríguez. **Redacción del borrador original:** Osvaldo Cuesta Santos, Rosemary López Lee, Amanda de la Rosa González, Arnaldo Collazo Aranda, Evelio García Rodríguez. **Redacción, revisión y edición:** Osvaldo Cuesta Santos

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/)

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que un 99% de la población mundial respira aire con niveles de calidad inferiores a los mínimos fijados por esta organización y realiza un llamado para la reducción del consumo de combustibles fósiles entre otras medidas para mejorar la calidad del aire (EFEverde, 2022).

El informe muestra que un 99 % de las ciudades en países con ingresos medios y bajos y un 17 % de las naciones más ricas no cumplen con los estándares respecto al Material Particulado, ni en el caso de las PM_{10} (10 micras de diámetro) ni en las más nocivas $PM_{2.5}$ (con un diámetro inferior a 2,5 micras).

La organización Mundial de la salud (OMS) fijó su recomendación en el caso de las partículas $PM_{2.5}$ a menos de 15 microgramos por metro cúbico de aire (OMS, 2006; WHO, 2021), una cifra que, por ejemplo, multiplica por 30 la ciudad india de Ahmedabad, la que muestra peores cifras en este caso.

De las 20 peores mediciones de partículas $PM_{2.5}$ según el estudio, 18 se encuentran en localizaciones de la India, dos en Bangladesh y una en China. Las partículas $PM_{2.5}$ son las más nocivas para la salud, ya que debido a su pequeño tamaño pueden llegar a los pulmones y acceder al flujo sanguíneo, por lo que pueden contribuir a problemas cardiovasculares y cerebrovasculares, además de las dolencias respiratorias (Campbell-Lendrum y Prüss-Ustün, 2019).

Un informe del Banco Mundial señaló, que la contaminación atmosférica causa una de cada 10 muertes en el mundo, convirtiéndose en el cuarto factor de deceso prematuro y provocando pérdidas en términos de bienestar que totalizan 5,1 billones de dólares (World Bank, 2016). Noticias como esta muestran que la contaminación del aire, es uno de los principales problemas medioambientales en la actualidad.

La contaminación atmosférica puede ser definida como “una condición de la atmósfera en la cual están presentes, sustancias en concentraciones tales como para afectar la calidad y composición del aire y provocar efectos perjudiciales para los seres humanos, los elementos naturales, ecosistemas, materiales, construcciones e instalaciones, el clima etc.” (López, 2006).

En distintas regiones del mundo, suceden episodios de poca dispersión superficial, los cuales se relacionan con patrones sinópticos específicos, como pueden ser las altas presiones y subsidencia (Horton et al., 2012; Wei et al., 2011). Estas condiciones pueden favorecer el estancamiento del aire superficial, lo que afecta negativamente la dispersión de contaminantes atmosféricos cercanos a la superficie, incrementando su concentración en condiciones locales de emisión (Whiteman et al., 2014). Episodios invernales significativos de ventilación débil y altos niveles de contaminación superficial asociados a forzantes de escala sinóptica, son

descritos en muchas ciudades del mundo; por ejemplo en Nanjink, Beujing, Taiyuan, Lanzhou y Guangzhou en China, por ejemplo (Li et al., 2014; Wang et al., 2014), Boston, New York, St. Louis, Birmingham, Cleveland, Philadelphia y Seattle en los Estados Unidos de América (Davis y Kalkstein, 1990; Greene et al., 1999; Pasch et al., 2011), Christchurch en Nueva Zelanda, por ejemplo (Appelhans et al., 2012), Eordean, Grecia (Triantafyllou, 2001), Moscú en Rusia (Shahgedanova et al., 1998), Santiago (Rutllant y Garreud, 1995; Toro et al., 2019) y Valparaíso en Chile (Pozo et al., 2019), La Habana, Cuba (Álvarez y Álvarez, 2000; Cuesta et al., 2019; Reyes et al., 2023; Sánchez y Cuesta, 1992).

Las condiciones meteorológicas influyen en las concentraciones de contaminantes atmosféricas. Los estudios realizados sobre contaminación atmosférica se despliegan en tres niveles fundamentales, asociados a las escalas de los procesos meteorológicos, en los que se incluye el nivel global, regional y local (Cuesta et al., 2014). Este último, responde a los efectos inmediatos del deterioro de la calidad del aire sobre la salud humana o sobre los ecosistemas.

La concentración de contaminantes en el aire depende, no solo de la cantidad que haya sido emitida sino también de la capacidad de la atmósfera, de absorber o dispersar estos contaminantes. Para ello, es necesario conocer el comportamiento de los parámetros meteorológicos en la capa límite planetaria (Jayamurugan et al., 2013). Las condiciones meteorológicas influyen en las concentraciones de contaminantes atmosféricas.

Algunos trabajos relacionados con la influencia de factores meteorológicos en la dispersión y transporte de contaminantes atmosféricos, se han llevado a cabo por especialistas del Centro de Estudios sobre Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología. Entre ellos podemos mencionar a López (1978), Sánchez y Cuesta (1992) que explican la capacidad de las variables velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica y la altura de capa de mezcla, de incrementar o disminuir los valores de inmisión de contaminantes en la atmósfera sobre una zona determinada.

Se han relacionado, además, los patrones sinópticos con la contaminación atmosférica a diferentes escalas, para conocer así su comportamiento (Cuesta, 1995; Fonseca, 2010; Vidal et al., 2018).

Un fenómeno natural que tiene que ver con diferencias de temperatura y la manera en que se distribuye en la superficie, es la inversión térmica. Aunque esta en sí no provoca efectos en la salud, lo que causa daño, es la acumulación de contaminantes dentro de la capa de inversión. La inversión térmica es un tipo de característica que adquiere la atmósfera cuando la temperatura del aire, en vez de descender mientras subimos en altura, como es normal, va ascendiendo cada vez más; esto hace que la densidad del aire dentro de

la capa de inversión, la cual se relaciona directamente con la temperatura, aumenta con la altura, limitando así las corrientes ascendentes que se producen en la atmósfera.

Esto ocurre cuando el calor que recibe el suelo por radiación durante el día, se pierde de manera acelerada durante la noche, y las capas de aire cercanas a él se enfrían más rápido que las capas superiores de aire. La inversión térmica, se da con más frecuencia y duración durante el invierno porque hay menos horas de Sol y esto evita que el calentamiento de la base de la inversión sea más rápido y efectivo.

Este estudio evaluó la influencia de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, dirección y fuerza del viento) y los tipos de situaciones sinópticas (TSS) en condiciones de poca dispersión sobre las concentraciones de los contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10} y $PM_{2.5}$) en el Campus del Instituto Superior de Ciencias Aplicadas (InSTEC) de la Universidad de La Habana y en la localidad de San Miguel del Padrón durante el periodo de 2015 al 2017 a través de las mediciones realizadas en las estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos de las concentraciones de los contaminantes y de las variables meteorológicas, de las estaciones automáticas de calidad del aire, instalada en el InSTEC y en San Miguel del Padrón, pertenecientes al Centro de Estudios sobre Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología que trabajaron en el periodo del 2015 al 2017. Mientras que para los estudios de los Tipos de Situaciones

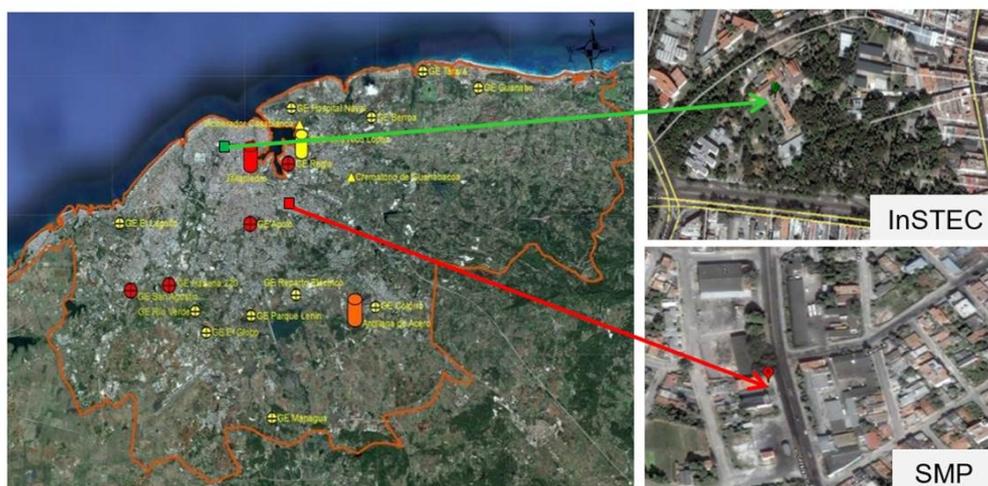
Sinópticas (TSS), se obtienen del Centro de Pronóstico del INSMET.

Los datos meteorológicos y las concentraciones de contaminantes registrados de forma continua por las Estaciones Automáticas de Monitoreo Atmosférico (EAMA). Ubicadas en la sede del Consejo de la Administración Municipal de San Miguel del Padrón (SMP), y en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), en Plaza de la Revolución fueron procesados de forma horaria y diaria para su análisis. En la **Figura 1**, se muestran las ubicaciones de ambas estaciones. Los datos de las ubicaciones geográficas se muestran en la **Tabla 1**.

Las estaciones automáticas están equipadas con sensores de la marca AIRMAR, que de manera continua y precisa miden las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento y presión barométrica del ambiente, según el **Manual de las Estaciones Automáticas (Vidal et al., 2018)**.

En el estudio de las situaciones sinópticas asociadas, se utilizaron los archivos del Centro Nacional de Pronósticos del Instituto de Meteorología. Para la clasificación de los patrones sinópticos se tuvo en cuenta la metodología desarrollada por **Lapinel (1988)**. La misma permite identificar y clasificar el Tipo de Situación Sinóptica (TSS) representado en un mapa de superficie, considerando el patrón predominante de presión y viento, así como las variables meteorológicas asociadas. Comprende nueve tipos principales.

Se analizó la situación sinóptica predominante en el área de interés, en el horario de las 18:00 Z y se consultaron los Estados Generales del Tiempo (EGT), las Cartas del Estado del Tiempo en los diferentes



Fuente: Elaboración propia a partir de Cuesta et al. (2018)

Figura 1. EAMA y principales fuentes fijas en la ciudad de La Habana.

Tabla 1. Ubicación geográfica de las EAMA.

Estación	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Período de estudio
InSTEC Municipio Plaza de la Revolución	23°07'55.2"	82°22'53.1"	noviembre 2015 - octubre 2017
SMP Municipio San Miguel del Padrón	23°04'31.8"	82°19'23.8"	noviembre 2015 - octubre 2017

niveles de altura geopotencial y los Mapas Sinópticos de superficie del período de estudio.

En el desarrollo de la investigación se realizó un análisis estadístico descriptivo para conocer el comportamiento de las variables objeto de estudio. Se determinaron los valores promedios, máximos y mínimos.

La estación automática del InSTEC fue ubicada en la azotea del edificio central del InSTEC. La misma se encuentra rodeada de gran vegetación por estar en áreas de la Quinta de los Molinos, una de las principales zonas verdes de la ciudad. Esta alejada unos 100 metros aproximadamente de las vías circundantes (Bolufé et al., 2016). En este tipo de estaciones, los datos de concentración de contaminantes obtenidos se refieren a la exposición general de la población (Cuesta et al., 2020; López et al., 2015).

La estación automática de SMP fue ubicada en la azotea del Consejo de la Administración Municipal de San Miguel del Padrón. Se encuentra expuesta directamente al flujo vehicular y a diferencia de la del InSTEC, está próxima a una de las principales vías del territorio que es la Calzada de Güines (Bolufé et al., 2016). Esto determina que sea una estación urbana de exposición al tráfico y que los resultados estén estrechamente vinculados con los principales contaminantes asociados a las fuentes móviles y fuentes industriales cercanas (Bolufé et al., 2016; Cuesta et al., 2020; López et al., 2015; Vidal et al., 2018).

Las tareas de gestión de la contaminación atmosférica se asumen con un enfoque multiescalar. A nivel local estas actividades han alcanzado gran desarrollo, especialmente para el cuidado de la salud y el bienestar humano en los asentamientos urbanos. Por ello, se requiere contar con criterios de calidad del aire y normas para la emisión de contaminantes, así como con el desarrollo de estrategias para su implementación y control (López et al., 2014).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) como organismo especializado del sistema de Naciones Uni-

das desempeña el papel rector a nivel internacional en las actividades vinculadas con la evaluación y control de los efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud humana. A partir de datos epidemiológicos y toxicológicos relacionados con el medio ambiente, son elaboradas por la OMS las Guías de Calidad del Aire (GCA). Las mismas están destinadas a su uso en todo el mundo, pero se han elaborado para respaldar medidas orientadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública en distintas situaciones (López, 2006; WHO, 2021).

Las GCA se tienen en cuenta para la elaboración de las Normas de Calidad del Aire (NCA), que se promulgan en los países mediante la legislación y tienen un alcance nacional. Las normas nacionales varían en función del enfoque adoptado con el fin de equilibrar los riesgos para salud. Toman en cuenta, además, otras condiciones inherentes al país, como las posibilidades tecnológicas, los costos, niveles de exposición, así como las condiciones sociales, económicas y culturales (López, 2006; OMS, 2006; Vidal et al., 2018).

Actualmente se encuentra vigente la NC 1020:2014 que establece las CMA de contaminantes en el aire en zonas habitables (Tabla 2), así como los valores guías (VG) de calidad del aire (NC: 1020, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de las concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ en las estaciones de SMP y el InSTEC según las horas del día. Las concentraciones medias horarias que se obtuvieron en la EAMA de SMP, superan a las obtenidas en la EAMA del InSTEC, para ambos contaminantes. Este comportamiento se encuentra condicionado por la exposición directa de la estación de SMP a las emisiones provenientes del tráfico vehicular y de fuentes locales cercanas.

Tabla 2. CMA de contaminantes en el aire para zonas habitables.

Contaminantes	Nomenclatura	CMA (µg/m ³)	Tiempo de exposición
Dióxido de azufre	SO ₂	250	1 hora
		45	24 horas
		40	Media anual
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	160	1 hora
		40	24 horas
		35	Media anual
Ozono	O ₃	150	1 hora
		100	8 horas
Partículas en suspensión ≤ 10µm de diámetro	PM ₁₀	200	1 hora
		50	24 horas
		30	Media anual
Partículas en suspensión ≤ 2,5µm de diámetro	PM _{2,5}	100	1 hora
		25	24 horas
		15	Media anual

Fuente: (NC: 1020, 2014).

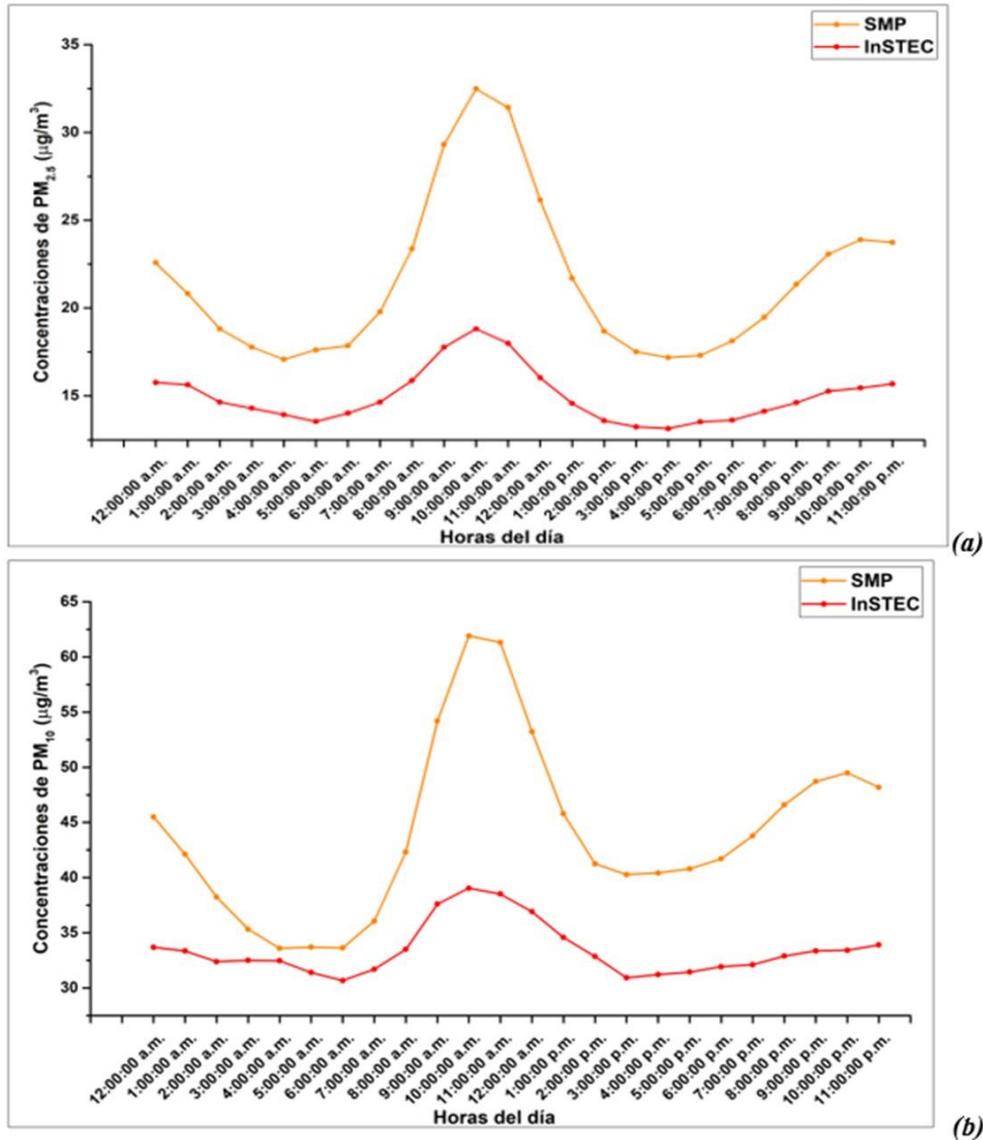


Figura 2. Comportamiento diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ (a) y PM_{10} (b) en SMP y el InSTEC

En la EAMA de SMP predominan los vientos del primer cuadrante, fundamentalmente del noreste al este (Vidal et al., 2018), por lo que las elevadas concentraciones reportadas con respecto a las del InSTEC, también pueden estar asociadas al transporte de contaminantes desde fuentes fijas ubicadas en la dirección predominante del viento de este sitio. Además, pudo haber contribuido el polvo levantado por el viento desde la superficie, ya que a diferencia del InSTEC, la estación de SMP no cuenta con vegetación alrededor (Vidal et al., 2018).

En general, en ambas estaciones se observan dos máximos de concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Uno de ellos, el más prominente, tiene lugar en el horario comprendido entre las 9:00 a.m. y 11:00 a.m., y se relaciona con el aumento del flujo vehicular en las mañanas (Jędruszkiewicz et al., 2017), así como a condiciones de alta estabilidad atmosférica y poca dis-

persión en horas de la mañana, que provocan gran acumulación de contaminantes (Seinfeld y Pandis, 2006).

En ambas EAMA, predominan los valores mínimos de velocidad del viento durante la noche y la madrugada (Vidal et al., 2018), a lo que pudo estar asociado el segundo máximo, que tuvo lugar entre las 9:00 pm y 12:00 pm. Esto se debe a que, al existir velocidades cercanas a la calma, no se favorece la dispersión de los contaminantes. Este comportamiento es similar al observado por Vidal et al. (2018) en las mismas estaciones, pero para el período de estudio noviembre 2015 - octubre de 2016.

Tanto en SMP como en el InSTEC, se sobrepasó en varias ocasiones la concentración máxima admisible (CMA) establecida por la NC 1020:2014 para el $PM_{2.5}$ en el período de 1 hora ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el caso del InSTEC se superó 4 veces, con valores que oscilaron

entre los 100 y 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras, en SMP se superó en 67 ocasiones con valores entre los 100 y 201 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo mismo ocurrió con la CMA establecida para el PM_{10} en 1 hora (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pues en el InSTEC, se sobrepasó un total de 10 veces, y en 6 de ellas se reportaron valores extremos que estuvieron entre los 341 y 643 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En SMP, se superó en 23 ocasiones y los valores oscilaron entre los 204 y 268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones horarias promedio más elevadas ocurrieron en la estación de SMP, asociadas a las emisiones del flujo vehicular y algunas fuentes industriales ubicadas en la región inmediata circundante. También contribuye el polvo resuspendido por el viento desde la superficie. Durante el primer periodo de mediciones horarias (noviembre de 2015 a octubre 2016) los máximos valores horarios ocurren en la estación del InSTEC (Tabla 3), destacándose el valor de 520,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que supera la Cma en 2,6 veces, para el PM_{10} y el valor máximo de 299,3 para el $\text{PM}_{2,5}$ que supera la Cma en tres veces, lo cual muestra que la calidad del aire puede catalogarse como pésima en esa estación. Mientras que las horas en que las concentraciones superan la concentración máxima admisible (Cma) siempre fue superior en la estación de SMP y se destaca el segundo periodo de estudio desde noviembre de 2016 a octubre de 2017 con 54 y 13 horas para el PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ respectivamente.

Por otro lado, al analizar las concentraciones diarias promedio las más elevadas ocurren también en la estación de SMP en todo el periodo (Tabla 4). Durante el primer periodo de mediciones promedios diarias (noviembre de 2015 a octubre 2016) los promedios para el $\text{PM}_{2,5}$ fueron superiores al del PM_{10} en las dos

estaciones. Mientras que los días en que las concentraciones superan la concentración máxima admisible (Cma) siempre fue superior en la estación SMP y se destaca el segundo periodo de estudio desde noviembre de 2016 a octubre de 2017 con 45 días para el PM_{10} .

Además de los valores por encima de la concentración máxima admisible para las partículas se analizaron las concentraciones de los gases y en muchos de los casos coincidieron con los valores por encima de las CMA. En la Tabla 5. se analiza los valores por encima de la CMA en ambas estaciones durante los dos años de monitoreo.

El material particulado fue el contaminante que más veces sobrepasó la CMA durante el periodo de dos años de esta investigación. El PM_{10} sobrepasó la CMA diaria en la estación de monitoreo de SMP en 74 veces. Mientras que el $\text{PM}_{2,5}$ sobrepasó la CMA diaria en 64 veces. La situación sinóptica que contribuyó de forma predominante a la ocurrencia de estas altas concentraciones fue la TSS VIII (Anticiclón Continental Migratorio), que representa el 48%, en el segundo lugar se presenta la TSS VI (Bajas Extratropicales), con un 22% de casos y en tercer lugar la TSS I (Anticiclón del Atlántico), con un 14% de casos. Las muestras horarias que estuvieron por encima de la CMA horaria según la NC 1020 del 2014 fueron 59 y 31 veces para el PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ respectivamente. En las muestras horarias la fuerza del viento siempre fue menor de 2 m/s.

Por otro lado, en la estación de monitoreo de calidad del aire del campus universitario de La Habana (INSTEC), el PM_{10} sobrepasó la CMA diaria en 21 ocasiones. Para el caso del $\text{PM}_{2,5}$ fueron sobrepasa-

Tabla 3. Mediciones horarias de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ en las estaciones InSTEC y SMP en el período desde noviembre de 2015 hasta octubre de 2016 y desde noviembre de 2016 a octubre de 2017.

Contaminantes	PM_{10}		$\text{PM}_{2,5}$		PM_{10}		$\text{PM}_{2,5}$	
	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP
Total de mediciones horarias	2450	4151	2088	3508	2088	3508	2424	4151
% de muestras en el período	27,9	47,3	23,8	40,0	23,8	40,0	27,6	47,3
Media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33,7	42,5	35,2	43,8	17,0	23,1	13,1	18,4
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	520,2	246,9	299,3	268,4	140,1	200,9	89,7	168,0
Cma 1 hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200		100		200		100	
Total casos > Cma	3	5	4	18	4	54	0	13

Tabla 4. Mediciones diarias de los contaminantes en las estaciones del InSTEC y SMP en el período desde noviembre de 2015 hasta octubre de 2016 y desde noviembre de 2016 a octubre de 2017.

Contaminantes	PM_{10}		$\text{PM}_{2,5}$		PM_{10}		$\text{PM}_{2,5}$	
	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP	InSTEC	SMP
Total de mediciones diarias	102	180	98	167	98	167	102	180
% de muestras en el período	27,9	49,2	26,8	45,8	26,8	45,8	27,9	49,2
Media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34,0	42,5	36,2	44,0	17,6	23,2	13,2	18,3
Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	109,5	119,8	112,8	128,9	54,3	72,8	41,6	72,0
Cma 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50		25		50		25	
Total casos > Cma	8	29	11	43	13	45	6	21

Tabla 5. Número de veces por encima de la CMA según NC 1020:2014 y concentración media asociada en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Estación/Contaminantes	INSTEC (Casos)	INSTEC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SMP (Casos)	SMP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
SO ₂ Horario	1	277,2	-	-
SO ₂ Diario	2	56,4	5	58,2
PM ₁₀ Horario	7	394,2	59	233,1
PM ₁₀ Diario	21	73,8	74	133,5
PM _{2,5} Horario	4	120,9	31	131,5
PM _{2,5} Diario	17	32,8	64	74,8
NO ₂ Horario	1	170,4	4	184,5
NO ₂ Diario	3	43,6	7	48,9
O ₃ Horario	5	488,2	1	498,8
O ₃ (8 Horas)	1	165,3	3	177,3

das la CMA en 17 veces. Las situaciones sinópticas que provocaron estas altas concentraciones fueron el Anticiclón Continental Migratorio y el Anticiclón del Atlántico cuando provocaron poca dispersión por subsidencia, inversión de temperatura y vientos débiles o calma. Las muestras horarias que estuvieron por encima de la CMA horaria según la NC 1020 del 2014 fueron 7 y 4 veces para el PM₁₀ y PM_{2,5} respectivamente.

Los demás contaminantes gaseosos sobrepasaron sus respectivas CMA en pocas ocasiones para muestras horarias y diarias y coincidieron en tiempo con las ocurridas para el material particulado.

A continuación, se estudiarán las altas concentraciones horarias ocurridas en casos relevantes de poca dispersión en el periodo de monitoreo en ambas estaciones. Se describirán las situaciones sinópticas y la influencia de algunas variables meteorológicas.

Al analizar el comportamiento horario de los contaminantes podemos apreciar que en la estación de monitoreo de SMP se desarrolló un episodio de altas concentraciones durante el día 15 de marzo del 2016 (Figura 3). El PM₁₀ alcanzó valores de concentraciones entre 246,9 y 57,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este valor máximo supera la CMA para este contaminante según la NC 1020:2014 y fue superado en el intervalo entre las 6 y

las 11 de la mañana. Por otro lado, el PM_{2,5} también refleja valores altos los cuales oscilan entre 168 y 21,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando la CMA durante las últimas horas de la madrugada y de la mañana (desde las 4 am a las 11 am). Estos valores confirman que la calidad del aire se cataloga de pésima durante ese día según la NC 111:2004. Este caso fue el único catalogado como episodio extremo de contaminación (SMOG) durante este periodo.

Durante ese día las condiciones meteorológicas favorecieron los procesos de acumulación y transporte de contaminantes durante la madrugada y las primeras horas de la mañana desde las fuentes fijas cercanas (Refinería y central térmica).

El tipo de situación sinóptica es la TSS VIII que está vinculada con la influencia sobre nuestro territorio de las altas típicas polares continentales de Norteamérica, que tienden, por lo general, a desplazarse al sudeste y luego al este hacia el Atlántico. Desde el día 14 de marzo de 2016 a las 18 UTC, Cuba y sus mares adyacentes se hallaban bajo la influencia de una dorsal anticiclónica que se extendía al oeste suroeste desde un centro de altas presiones con centro de 1020 hPa sobre el Atlántico. Además, se apreciaba un débil centro de altas presiones que se encuentra al norte de la región occidental (Figura 4). Mientras que al día siguiente la celda de altas presiones que se localizaba

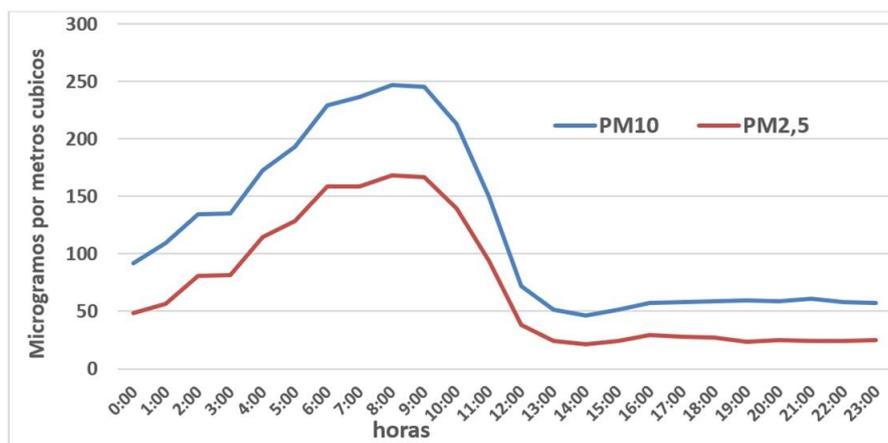


Figura 3. Comportamiento de las concentraciones horarias durante el día 15 de marzo de 2016. En la estación de SMP

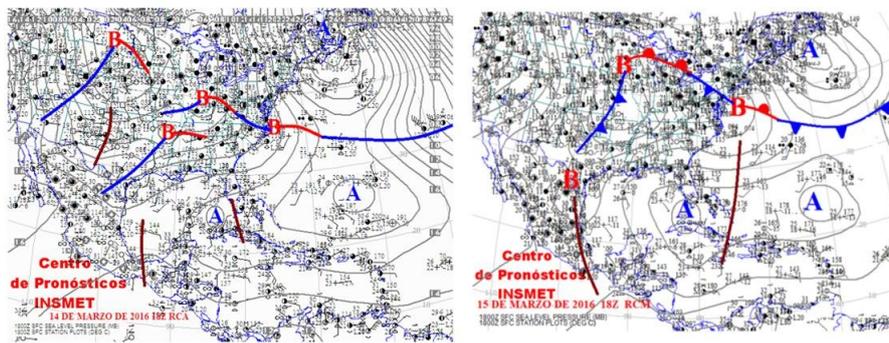


Figura 4. Situaciones sinópticas asociadas al evento de altas concentraciones (smog) durante el día 15 de marzo de 2016

sobre el Atlántico se debilita y por el contrario la débil celda de altas presiones que se localizaba próxima a la región occidental experimenta un proceso de fortalecimiento y expansión abarcando con su influencia gran parte de la región occidental, correspondiéndose con el subtipo 11. Lo cual provoca vientos débiles y subsidencia con la correspondiente situación de smog. Ocurriendo una acumulación en estas horas de la madrugada y la mañana (Sánchez y Cuesta, 1992).

Además, es conocido que los anticiclones intensos pueden estar asociados en superficie con estancamiento atmosférico (EA) lo cual está relacionado con la poca ventilación y dispersión vertical y a su vez con episodios críticos de calidad del aire (Davis y Kalkstein, 1990; Horton et al., 2012, 2014; Whiteman et al., 2014).

Dentro de las características de los EA se encuentran: presentar un lento desplazamiento del patrón sinóptico; viento débil en algunas zonas próximas a la superficie y movimiento descendente del aire desde tropósfera media, fenómeno que es conocido como subsidencia. Esta última característica, de viento descendente o de subsidencia, provoca una compresión adiabática del aire, calentándolo desde la altura. Este calentamiento genera perfiles termodinámicamente más estables, es decir capas cálidas de la atmósfera ubicadas por sobre capas frías, lo que da como resultado una inversión térmica vertical o un aumento de la temperatura potencial con la altura (Lu y Zhong, 2014; Stull, 1988; Wang y Angell, 1999). La inversión térmica inhibe la mezcla vertical de los contaminantes, y puede llegar a provocar un confinamiento de los contaminantes atmosféricos cuando son emitidos en las zonas bajas de la tropósfera, próximas al suelo dentro de la capa de mezcla (Bressi et al., 2013; Dawson et al., 2014; Leibensperger et al., 2008; Tai et al., 2010).

Esta situación acelera el incremento de la concentración de los contaminantes que son emitidos en superficie, al existir un menor volumen de aire en que diluirse. Estas condiciones se pueden agudizar en horas de la noche y madrugada, momento en que se suele generar una inversión térmica nocturna, por una mayor pérdida radiativa superficial favorecida por

noches de escasa o nula nubosidad (Daly et al., 2010), condición normal de observar en días con EA. Adicionalmente, bajo condiciones adecuadas de radiación y gases precursores, durante un EA se puede provocar un incremento en la formación de material particulado de origen fotoquímico (Whiteman et al., 2014). Por el contrario, los procesos comunes que facilitan el descenso de las concentraciones de contaminantes atmosféricos como el transporte, la deposición seca por impactación y húmeda se encuentran debilitados durante este tipo de eventos (Gómez, 2022).

Esta situación meteorológica, junto a las emisiones por fuentes fijas y móviles incentiva que las partículas más grandes puedan penetrar el tracto respiratorio, que suelen tener un diámetro menor de $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}). Las más pequeñas, aquellas que tienen un diámetro menor $2,5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) pueden alcanzar fácilmente los pulmones y desde allí ser absorbidas directamente al torrente sanguíneo, provocando efectos nocivos conocidos a las personas. Estas últimas, también se asocian con la reducción de la visibilidad, especialmente cuando su tamaño oscila entre $0,4$ y $0,8\ \mu\text{m}$, que corresponde al rango de longitud de onda de la luz visible.

El comportamiento de las variables meteorológicas correspondiente al día 15 de marzo de 2016 se aprecia en las Figuras 5 y 6, la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura. La velocidad del viento en metros por segundo, prácticamente calma toda la madrugada y hasta bien entrada la mañana. Lo cual favoreció la acumulación de los contaminantes, específicamente material particulado, como se muestra en la Figura 3. Aumentando la fuerza del viento en la tarde y vuelve a disminuir en la noche. La dirección del viento durante toda la noche y primeras de la mañana de dirección suroeste, muy débiles, casi calma. Se mantiene con dirección sur con vientos muy débiles en la mañana. Y se mantiene del sureste durante el resto del día, aumentando un poco su velocidad.

La Humedad Relativa aumenta en la madrugada y la temperatura seca (Figura 6) disminuye manteniendo un patrón clásico en este día.

El comportamiento de estas variables meteorológicas está en correspondencia con la característica de estancamiento atmosférico con viento débil y movimien-

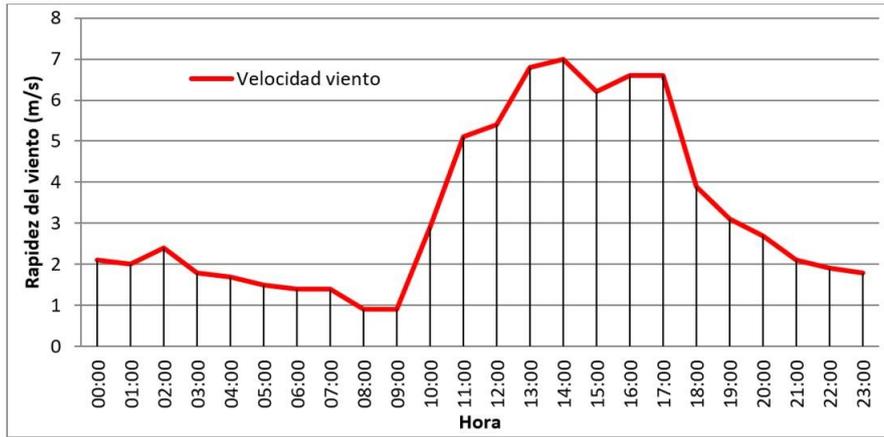


Figura 5. Fuerza del viento, en metros por segundo

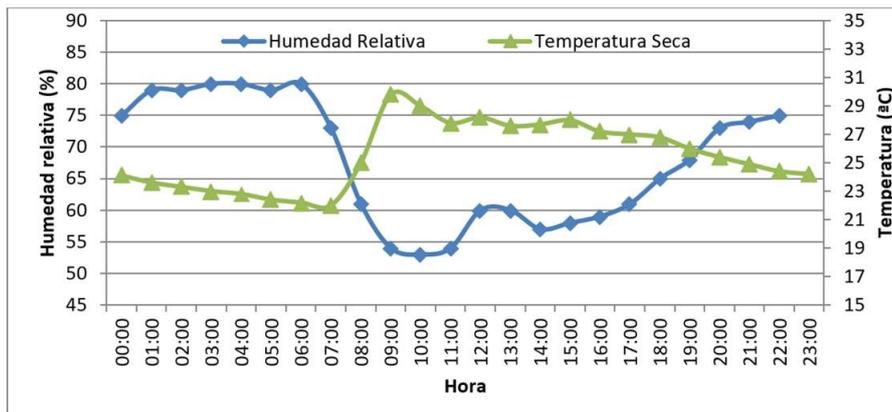


Figura 6. Humedad relativa y temperatura seca. En porciento y grados Celsius respectivamente.

to descendente del aire por subsidencia. Provocando también una inversión térmica que inhibe la mezcla vertical de los contaminantes, y puede llegar a provocar un confinamiento de los contaminantes atmosféricos cuando son emitidos por fuentes próximas al suelo dentro de la capa de mezcla.

Por otro lado, en la estación del Campus Universitario (InSTEC) se desarrolló también un episodio de altas concentraciones durante el día 15 de marzo del 2016 (Figura 7). El PM_{10} alcanzó valores de concentraciones entre 23,2 y 126,2 $\mu g/m^3$, este valor máximo no supera la Cma para este contaminante según la NC 1020:2014 y sus máximos valores ocurren en el intervalo entre las 7 y las 12 de la mañana. Por otro lado, el $PM_{2,5}$ también refleja valores altos los cuales oscilan entre 18,1 y 79,6 $\mu g/m^3$, tampoco supera la Cma y mantiene un comportamiento similar al PM_{10} . Estos valores confirman que la calidad del aire se cataloga de buena durante ese día según la NC 111:2004.

Durante ese día las condiciones meteorológicas favorecieron los procesos de acumulación y transporte de contaminantes durante la madrugada y las primeras horas de la mañana desde las fuentes fijas cercanas (Refinería y central térmica). Pero los valores de los

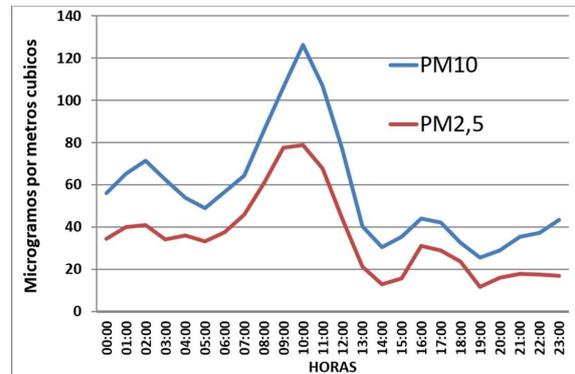


Figura 7. Comportamiento de las concentraciones horarias durante el día 15 de marzo de 2016. Estación INSTEC.

contaminantes no llegaron a sobrepasar la CMA, en el INSTEC.

Otro día de interés por las altas concentraciones ocurre el 18 de marzo de 2016. En la Figura 8 se muestran los valores de concentración para el material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y el ozono superficial (O_3) en la localidad de San Miguel del Padrón. El material particulado alcanza valores máximos alrededor de las 11 de la mañana de 143 y 70 $\mu g/m^3$ para el PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente. Mientras que el ozono superfi-

cial alcanza valores máximos de 91,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la tarde. Las condiciones sinópticas favorecieron el aumento de las concentraciones respecto a sus valores medios en las horas señaladas.

La formación de ozono también se favorece bajo las condiciones de poca dispersión de contaminantes, ya que sus precursores aumentan sus concentraciones.

Sobre Cuba, en el mapa sinóptico (Figura 9), se observa la influencia de un centro de alto barómetro, localizado en los 26.46 ° N y los 66.34 ° W, que impone vientos del este sobre la mitad oriental del país y del este al sudeste sobre el occidente. La cuña anticiclónica penetra casi zonalmente sobre la Península de la Florida y norte del Golfo de México, dejando al archipiélago bajo una masa de aire que comienza a ser más húmeda e inestable, principalmente en la región occidental. Con la altura el centro de alta inclina su eje al suroeste hasta ubicarse en 500 hPa sobre Jamaica dejando corrientes del suroeste a partir de 700 hasta los 200 hPa sobre el occidente del país, por eso la inestabilidad se incrementa y aparece alguna probabilidad de lluvia sobre la región occidental, principalmente en costa norte de Mayabeque y Matanzas que será más numerosa sobre la isla de la Juventud. el centro de alta se ubica más al este nordeste sobre el Atlántico por eso el giro de los vientos del este al sudeste en el occidente y de región este en el resto del archipiélago.

Este tipo de situación sinóptica (TSS VIII) se corresponde con el subtipo 10, asociada al anticiclón continental migratorio ubicado al este de los E.U, sobre el océano y en rápida tropicalización. Lo cual también favorece en horas de la madrugada y la mañana la acumulación de contaminantes. Es la situación sinóptica que más contribuye a la ocurrencia de altas concentraciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El material particulado fue el contaminante que más veces sobrepasó la CMA durante el periodo de dos años de esta investigación. El PM_{10} sobrepasó la CMA diaria en la estación de monitoreo de SMP en 74 veces. Mientras que el $\text{PM}_{2,5}$ sobrepasó la CMA diaria en 64 veces. La situación sinóptica que contribuyó de forma predominante a la ocurrencia de estas altas concentraciones fue la TSS VIII (Anticiclón Continental Migratorio) y el segundo lugar la TSS I (Anticiclón del Atlántico). Las muestras horarias que estuvieron por encima de la CMA horaria según la NC 1020 del 2014 fueron 59 y 31 veces para el PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ respectivamente.

Por otro lado, en la estación de monitoreo de calidad del aire del campus universitario de La Habana (INTEC), el PM_{10} sobrepasó la CMA diaria en 21 ocasiones. Para el caso del $\text{PM}_{2,5}$ fueron sobrepasadas la CMA en 17 veces. Las situaciones sinópticas que provocaron estas altas concentraciones fueron el

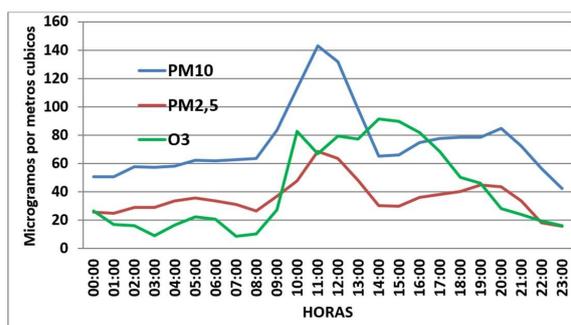


Figura 8. Comportamiento de las concentraciones horarias durante el día 18 de marzo de 2016. En la estación de SMP

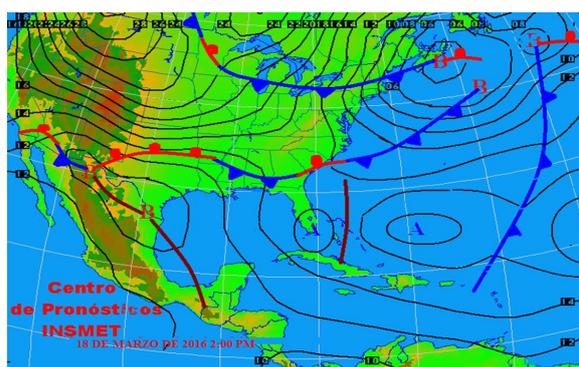


Figura 9. Situaciones sinópticas asociadas a valores de concentraciones ocurridas el día 18 de marzo de 2016 en la estación SMP.

Anticiclón Continental Migratorio y el Anticiclón del Atlántico cuando provocaron poca dispersión por subsidencia, inversión de temperatura y vientos débiles o calma. Las muestras horarias que estuvieron por encima de la CMA horaria según la NC 1020 del 2014 fueron 7 y 4 veces para el PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ respectivamente.

Los demás contaminantes gaseosos sobrepasaron sus respectivas CMA en pocas ocasiones para muestras horarias y diarias y coincidieron en tiempo con las ocurridas para el material particulado.

El único evento catalogado como episodio extremo de altas concentraciones (SMOG) se desarrolló en la estación de monitoreo de la calidad del aire de SMP durante el día 15 de marzo de 2016.

Se obtuvo el comportamiento de las concentraciones de estos contaminantes y de las variables meteorológicas, y de los TSS que influyeron para la ocurrencia de estos episodios de poca dispersión de contaminantes

Los máximos valores de concentración de SO_2 se obtuvieron cuando se estaba bajo la débil influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, por lo que el aporte fundamental de este contaminante es desde fuentes locales de la ciudad.

En el caso del NO_2 en SMP los anticiclones continentales migratorios no favorecen la dispersión y transporte de este contaminante. La formación de ozono también se favorece bajo las condiciones de poca

dispersión de contaminantes, ya que sus precursores aumentan sus concentraciones.

RECOMENDACIONES

Continuar los estudios sobre las condiciones sinópticas que influyen en la ocurrencia de poca dispersión y acumulación de contaminantes atmosféricos con el fin de ser utilizados en el pronóstico de calidad del aire y contribuir al conocimiento de los efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud.

REFERENCIAS

- Alonso, A. (2013). *Estudio de algunos factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación atmosférica en La Habana* [Trabajo de Diploma]. InSTEC.
- Appelhans, T., Sturman, A., y Zawar-Reza, P. (2012). Synoptic and climatological controls of particulate matter pollution in a Southern Hemisphere coastal city. *International Journal of Climatology*, 33(2), 463-479. <https://doi.org/10.1002/joc.3439>
- Álvarez, R., Álvarez, L. (2000). El efecto de acumulación y su influencia en el patrón de dispersión de contaminantes. *Revista Brasileña de Meteorología*, 15(1), 103-111.
- Barcia Sardiñas, S., Ballester Pérez, M. García Valdés, E., González Socorro, J., Cedeño Rojas, Y., y Regueira Molina, V. (2014). Variabilidad temporal de las variables meteorológicas que intervienen en los pronósticos a corto plazo en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(2), 114-124.
- Bolufé et al. (2016). *Influencia de la variabilidad del clima y la calidad del aire en algunas enfermedades crónicas no transmisibles en la región occidental de Cuba* (Informe científico técnico). INSMET.
- Bressi, M., Sciare, J., Gherzi, V., Bonnaire, N., Nicolas, J.-F., Petit, J.-E., Moukhtar, S., Rosso, A., Mihalopoulos, N., y Feron, A. (2013). A one-year comprehensive chemical characterisation of ne aerosol (PM_{2.5}) at urban, suburban y rural background sites in the region of Paris (France). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(15), 7825-7844. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7825-2013>
- Cala, Y. (2015). *Patrones sinópticos y zonas de procedencia de masas de aire asociados a la acidificación de las lluvias en Casablanca*. [Trabajo de Diploma]. InSTEC.
- Calderón, V. A. (2011). *Evaluación de riesgos a la salud humana y vegetal debido a la presencia atmosférica de contaminantes MP₁₀, MP_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃ y elementos traza en la cuenca del Aconcagua, Chile*. [Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental]. Universidad de Chile.
- Campbell-Lendrum, D., y Prüss-Ustün, A. (2019). Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. *Bulletin of the World Health Organization*, 97(2), 160-161. <https://doi.org/10.2471/blt.18.224295>
- Collazo, A. (2011). *Análisis de la contaminación transfronteriza y local de contaminantes gaseosos precursores de la depositación ácida húmeda y formación de ozono en Cuba*. [Tesis en opción al grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental]. Universidad de Chile.
- Cremata, L. (2013). *Influencia de los Tipos de Situaciones Sinópticas en la depositación total de metales pesados. Caso de estudio*. [Trabajo de Diploma]. InSTEC.
- Cuesta et al. (2000). *Evaluación del medio ambiente atmosférico en la ribera este de la bahía de La Habana y su repercusión en la salud* (Informe científico técnico). INSMET
- Cuesta et al. (2009). Estado de la Contaminación Atmosférica en Cuba. En GEO Cuba. Evaluación del medio ambiente cubano. Libro. Publicación del CITMA, PNUMA y AMA. Derechos de propiedad intelectual © 2009. ISBN 978-959-300-002-4.
- Cuesta et al. (2014). *Diagnóstico del medio ambiente atmosférico producto de las principales fuentes fijas de la Ciudad de la Habana* (Informe científico técnico). INSMET.
- Cuesta Santos, O. (1995). *Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los Tipos de Situaciones Sinópticas* [Tesis inédita]. INSMET
- Cuesta Santos, O., González Jaime, Y., Sosa Pérez, C., C, López Lee, R., Bolufé Torres, J., y Reyes Hernández, F. (2019). La calidad del aire en La Habana. Actualidad. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(3), 425-442. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/download/488/758>
- Cuesta Santos, O., López Lee, R., González Jaime, Y., Sosa Pérez, C., Bolufé Torres J., García Valdés, E., y Reyes Hernández, F. (2020). Comportamiento del material particulado en La Habana. Valores experimentales. *Revista Cubana de Meteorología*. 26(sp). 1-20.
- Daly, C., Conklin, D. R., y Unsworth, M. H. (2010). Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1857-1864. <https://doi.org/10.1002/joc.2007>
- Davis, R. E., y Kalkstein, L. S. (1990). Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations. *Physical Geography*, 11(4), 320-342. <https://doi.org/10.1080/027236-16.1990.10642410>

- Dayan, U., y Lamb, D. (2003). Meteorological indicators of summer precipitation chemistry in central Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, 37(8), 1045-1055. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00992-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00992-5)
- Dawson, J. P., Bloomer, B. J., Winner, D. A., y Weaver, C. P. (2014). Understanding the meteorological drivers of U.S. particulate matter concentrations in a changing climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(4), 521-532. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00181.1>
- EFEverde (2022, April 4). *Un 99 % de la humanidad respira aire insalubre, advierte la OMS*. EFEverde. <https://efeverde.com/aire-insalubre-oms/>
- Fonseca, M. (2010). *Caracterización de las concentraciones de los gaseosos del nitrógeno atmosférico asociados a diversos Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) en la estación La Palma, Pinar del Río, Cuba*. [Trabajo de Diploma]. INSTEC
- Galloway, J. N., Knap, A. H., y Church, T. M. (1983). The composition of western Atlantic precipitation using shipboard collectors. *Journal of Geophysical Research* 88(C15). 10859-10864
- García, M., Ulloa, H., Ramírez, H., Fuentes, M., Arias, S., y Espinoza, M. (2014). Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1(2). 97-116
- Gómez Parada, L. A. (2001). *Comportamiento espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos medidos por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Santiago*. [Tesis de diploma, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188335>
- Gómez Parada, L. A. (2022). *Caracterización meteorológica de los episodios extremos de contaminación por material particulado fino en Coyhaique, Patagonia, Chile*. [Tesis para optar al grado de Magister en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184588>
- Greene, J. S., Kalkstein L. S., Ye, H., y Smoyer, K. (1999). Relationships between synoptic climatology y atmospheric pollution at 4 US Cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3),163-174. <https://doi.org/10.1007/s007040050081>
- Horton, D. E., Harshvardhan, H., y Dienbaugh, N. S. (2012). Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044034>.
- Horton, D. E., Skinner, C. B., Singh, D., y Dienbaugh, N. S. (2014). Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature Climate Change*, 4(8), 698-703. <https://doi.org/10.1038/nclimate2272>
- Lapinel, B. (1988). *La circulación atmosférica y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba*. [Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas]. INSMET.
- Lecha, L.; Paz, L. R., y Lapinel, B. (1994). *El Clima de Cuba*. Editorial Academia.
- Leibensperger, E. M., Mickley, L. J., y Jacob, D. J. (2008). Sensitivity of US air quality to mid-latitude cyclone frequency y implications of 1980-2006 climate change. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8(23), 7075-7086. <https://doi.org/10.5194/acp-8-7075-2008>
- Li, L., Qian, J., Ou, C. Q., Zhou, Y. X., Guo, C., y Guo, Y. (2014). Spatial y temporal analysis of Air Pollution Index y its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011. *Environmental Pollution*, 190, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.03.020>
- López, C. (1978). *Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en La ciudad de La Habana* (Informe Científico - Técnico No. 46). Editorial Academia
- López, C. (2006). *Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire*. Versión electrónica. Registro de Derecho de Autor No: 583 - 2007. Centro de Química y Contaminación Atmosférica, INSMET. La Habana, Cuba.
- López et al. (2015). *Contribución a la gestión de la calidad del aire en Cuba: Gases contaminantes y Componentes químicos de la lluvia y su relación con las fuentes de emisión y condiciones meteorológicas* (Informe de proyecto del CITMA). INSMET
- Lu, W., y S. Zhong. (2014). A numerical study of a persistent cold air pool episode in the Salt Lake Valley, Utah. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(4), 1733-1752. <https://doi.org/10.1002/2013JD020410>
- Manual de las Estaciones Automáticas - Automated Air Quality Monitoring System (TH-2000). República Popular China.
- Mojena López, E., Ortega González, A., Casilles Vega, E., y Leyva Santos, Julia. (2015). Nubes de polvo del Sahara. Su presencia en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 21(1), 120-134
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de los riesgos. Actualización mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambie>

- [ntal/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/who_sde_phe_oe_h_0602_spa_tcm30-187909.pdf](#)
- Pasch, A. N., MacDonald, C. P., Gilliam, R. C., Knoderer, C. A., y Roberts, P. T. (2011). Meteorological characteristics associated with PM_{2.5} air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7026-7035. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.065b>
- Pérez, L. (2013). *Lluvia y bienestar térmico en La Habana*. [Trabajo de Diploma]. InSTEC.
- Pozo, D., Marín, J. C., Raga, G. B., Arévalo, J., Baumgardner, D., Córdova, A. M., y Mora, J. (2019). Synoptic y local circulations associated with events of high particulate pollution in Valparaiso, Chile. *Atmospheric Environment*, 196(October 2018), 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.006>
- Reyes Hernández, F., Cuesta Santos, O., González Cruz, R., Palacio Iglesias, D., y Guzmán Vila, M. (2023). Comportamiento de contaminantes atmosféricos en zonas de 2 municipios de La Habana en el trienio 2015-2017. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(1), 1-9
- Rutllant, J., y Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: Towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34(3), 223-244. <https://doi.org/10.1007/BF00554796>
- Sánchez, P., y Cuesta, O. (1992). Smog en la Ciudad de La Habana. Situación meteorológica asociada. *Revista Cubana de Meteorología*, 5(1), 3-8
- Sanhueza P., Vargas, C., y Mellado, G. (2006). Impacto de la contaminación del aire por PM₁₀ sobre la mortalidad diaria en Temuco. *Revista médica de Chile* 134(6), 754-761. <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0034-8872006000600012>
- Shahgedanova, M., Burt T. P., y Davies T. D. (1998). Synoptic climatology of air pollution in Moscow. *Theoretical and Applied Climatology*, 61(1), 85-102. <https://doi.org/10.1007/s007040050054>
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Tai, A. P., K., Mickley, L. J., y Jacob, D. J. (2010). Correlations between ne particulate matter (PM_{2.5}) y meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976-3984. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>
- Tang, A., Zhuang, G., Wang, Y., Yuan, H., y Sun, Y. (2005). The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment*, 39(19), 3397-3406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.02.001>
- Toro, A. R., Kvakic, M., Klai B. Z., Koracin, D., Morales, R., y Leiva, M. (2019). Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile. *Environmental Pollution*, 244, 705-714. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.067>
- Triantafyllou A. G. (2001). PM₁₀ pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area. *Environmental Pollution*, 112(3), 491-500. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00131-7)
- Vidal, I., López, R., Cuesta, O., Bolufé, J., y García, E. (2018). Condiciones meteorológicas en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*. 24(2), 146-158
- Wang, H., Xu, J., Zhang, M., Yang, Y., Shen, X., Wang, Y., Chen, D., y Guo, J. (2014). A study of the meteorological causes of a prolonged y severe haze episode in January 2013 over centraleastern China. *Atmospheric Environment*, 98,146-157. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.053>
- Wang, J. X. L., y Angell, J. K. (1999). *Air Stagnation Climatology for the United States (1948--1998)*. (Reporte técnico) National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/atlas.pdf>
- Wei, P., Cheng, S., Li, J., y Su, F. (2011). Impact of boundary-layer anticyclonic weather system on regional air quality. *Atmospheric Environment*, 45(14), 2453-2463. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.045>
- Whiteman, C. D., Hoch, S. W., Horel, J. D., y Charland, A. (2014). Relationship between particulate air pollution y meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmospheric Environment*, 94, 742-753. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.012>
- World Bank. (2016). *The cost of air pollution: strengthening the economic case for action*. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/781521473177013155/the-cost-of-air-pollution-strengthening-the-economic-case-for-action>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- Zhu, J., y Liu, Z. (2003). Long-range persistence of acid deposition. *Atmospheric Enviroment*, 37(19), 2605-2613. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00219-X)

Oswaldo Cuesta Santos. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: cuestaosvaldo52@gmail.com

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

Amanda de la Rosa González. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: amanda.gonzalez@insmet.cu

Arnaldo Collazo Aranda. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: arnaldo.collazo@insmet.cu

Evelio García Rodríguez. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: evelio.garcia@insmet.cu