

Evaluación del transporte de contaminantes atmosféricos en La Habana mediante el uso del modelo HYSPLIT



<https://cu-id.com/2377/v30n1e02>

Evaluation of the transport of atmospheric pollutants in Havana through the use of the HYSPLIT model

Naomy Maipú Mena Izquierdo*, Elieza Meneses Ruiz, Bárbara Liz Miravet Sánchez, Alina Roig Rassi

Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba.

RESUMEN: En Cuba no existen redes de monitoreo de calidad del aire. El objetivo de este estudio es evaluar la contaminación atmosférica por material particulado (PM) en La Habana mediante el empleo del modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model). Utilizamos mediciones in situ e imágenes satelitales de las plataformas Copernicus y Giovanni NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio) y fueron comparadas con las diferentes corridas realizadas del modelo para evaluar la efectividad del mismo. Los resultados obtenidos mostraron que, aunque realizar mediciones de material particulado siempre es la primera opción se puede afirmar que el empleo de modelos de transporte y dispersión de contaminantes, en específico del modelo HYSPLIT, son pertinentes para la estimación de la contaminación atmosférica por material particulado en La Habana.

Palabras clave: PM, mediciones in situ, imágenes satelitales, Copernicus, Giovanni NASA, HYSPLIT.

ABSTRACT: In Cuba there are no air quality monitoring networks. The objective of this study is to evaluate air pollution by particulate matter (PM) in Havana through the use of the HYSPLIT model. We used in situ measurements and satellite images of the Copernicus and Giovanni NASA platforms and they were compared with the different runs of the model to evaluate its effectiveness. The results obtained showed that although making measurements of particulate matter is always the first option, it can be affirmed that the use of models of transport and dispersion of pollutants, specifically the HYSPLIT model, are relevant for the estimation of atmospheric pollution by particulate matter in Havana.

Key words: PM, in situ measurements, satellite images, Copernicus, Giovanni NASA, HYSPLIT.

INTRODUCCIÓN

Uno de los contaminantes que suele ser más problemático es el material particulado o partículas en suspensión (PM). Las mediciones son imprescindibles para evaluar los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ que

caracterizan la calidad del aire de una zona, aunque para que estas sean eficientes, se debe contar con una red de estaciones de monitoreo que cubran el territorio nacional con la densidad establecida. Sin embargo, se conoce de antemano

*Autor para correspondencia: Naomy Maipú Mena Izquierdo. E-mail: naomy@cubaenergia.cu

Recibido: 30/11/2023

Aceptado: 12/01/2024

Naomy Maipú Mena Izquierdo. Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba. E-mail: naomy@cubaenergia.cu

Elieza Meneses Ruiz. Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba. E-mail: emeneses@cubaenergia.cu

Bárbara Liz Miravet Sánchez. Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba. E-mail: liz@cubaenergia.cu

Alina Roig Rassi. Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba. E-mail: arrassi@cubaenergia.cu

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

Contribución de los autores: Conceptualización, Conservación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción - borrador inicial: Naomy Maipú Mena Izquierdo. Conceptualización, Conservación de datos, Investigación, Administración de proyecto, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización: Elieza Meneses Ruiz. Metodología, Recursos, Redacción - revisión y edición: Bárbara Liz Miravet Sánchez. Redacción - revisión y edición: Alina Roig Rassi.

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/)

que las estaciones de monitoreo de calidad del aire son costosas, pues su inversión está en el orden de 200,000 USD para medir los contaminantes antes mencionados, a lo que se le añaden los gastos anuales en operación y mantenimiento.

Los datos e imágenes satelitales, aunque no presentan la misma precisión que una medición real, pueden proveer de información necesaria que ayude al diagnóstico de la contaminación atmosférica, pues aporta una visión global de la zona de estudio, indicando inclusive las fuentes de contaminación y dónde se deben enfocar aquellas medidas de prevención y control. El empleo de datos e imágenes satelitales se considera una de las opciones menos costosas y la información que estos brindan complementa la falta de datos causado por la falta de infraestructura de una red de monitoreo, además el uso de datos satelitales es aceptable para estimar la concentración de partículas por sus características físicas ya que pueden ser detectadas a partir del espectro electromagnético. A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan una visión única sobre la calidad del aire, complementando los métodos convencionales (Gutiérrez Quintero et al., 2021).

Los modelos de calidad del aire son representaciones de la realidad que sirven para simular sistemas reales bajo diferentes escenarios conocidos o supuestos (García Reynoso, 2010). El uso de modelos tiene particular importancia en Cuba debido a que la capacidad de las estaciones de monitoreo disponibles es extremadamente limitada. Actualmente en el país se dispone de la NC 1059: 2014 (Oficina Nacional de Normalización, 2014), que establece un enfoque por niveles para realizar modelaciones de la contaminación atmosférica.

Entre los modelos de trayectoria más utilizados está el Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) y en él se puede observar el transporte y dispersión de los contaminantes que se originan en una variedad de fuentes. Este simula la dispersión y la trayectoria de las sustancias a través de nuestra atmósfera, desde escalas locales hasta globales. Es una herramienta que ayuda a explicar cómo, dónde y cuándo sustancias químicas y materiales son transportados, dispersados y depositados. Conocerlo es esencial a la hora de responder de forma apropiada y prevenir catástrofes, permitiendo, por ejemplo, que los sistemas de emergencia puedan realizar una correcta evacuación de los afectados (Herrero Anta, 2019).

Con esta investigación, se pretende realizar evaluaciones de la calidad de aire en La Habana, a partir de la ocurrencia de eventos de contaminación atmosférica tanto regionales como locales, mediante el uso del modelo de transporte y dispersión de contaminantes HYSPLIT, como una herramienta de vigilancia, prevención y diagnóstico. Fortaleciendo las evaluaciones con el empleo de imágenes satelitales de las plataformas Copernicus y Giovanni NASA; y mediciones in situ. Todo esto a partir de tres casos de estudio:

- La erupción del Volcán Cumbre Vieja: ubicado a una distancia de 6017 Km de la provincia de La Habana, el volcán Cumbre Vieja inició su erupción el 19 de septiembre de 2021 en la isla La Palma, culminando el 13 de diciembre, después de 85 días de actividad.
- Termoeléctrica Ernesto Che Guevara: se encuentra a una distancia de la zona de estudio de 47,6 Km, perteneciente a la comunidad de Santa Cruz del Norte, actual provincia de Mayabeque.
- Datos in situ recogidos de la estación de CUBAENERGÍA: ubicada en calle 20/ 18a y 47, municipio Playa, provincia de La Habana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

La Habana (Figura 1) es la ciudad más poblada de Cuba, así como el mayor centro industrial y portuario del país, contando con muchas industrias fuertemente contaminantes (refinerías, termoeléctricas, fábrica de cemento, farmacéuticas, etc.) en su territorio, cuyas emanaciones a la atmósfera se depositan posteriormente en el suelo. El polvo acumulado en zonas urbanas contiene una diversidad de materiales que van, desde compuestos minerales hasta materiales orgánicos e inorgánicos de origen antropogénico, los que pueden ser depositados en la superficie de las calles y techos. Los metales pesados de la superficie del suelo y el polvo de las calles son buenos indicadores de la acumulación de PM en el entorno urbano (Díaz Rizo et al., 2019).



Figura 1. Imagen satelital de la provincia de La Habana

Modelo HYSPLIT

En el sistema HYSPLIT se puede observar el transporte y dispersión de los contaminantes que se originan en una variedad de fuentes. Este simula la dispersión y la trayectoria de las sustancias a través de nuestra atmósfera, desde escalas locales hasta globales (HYSPLIT, s. f.).

Es un sistema completo para calcular trayectorias simples de paquetes aéreos, así como simulaciones

complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición. Una de las aplicaciones más comunes de este modelo es el análisis de trayectoria trasera para determinar el origen de las masas de aire y establecer relaciones fuente- receptor. De igual manera dicho modelo también se ha utilizado en una variedad de simulaciones que describen el transporte atmosférico, la dispersión y la deposición de contaminantes y materiales peligrosos. Algunos ejemplos de las aplicaciones incluyen el seguimiento y pronóstico de la liberación de material radiactivo, humo de incendios forestales, polvo soplado por el viento, contaminante de diversas fuentes de emisión estacionarias y móviles, alérgenos y ceniza volcánica (Stein et al., 2015).

Gracias a la sencillez, rapidez y efectividad del modelo de trayectoria se pueden establecer las posibles direcciones que llevan las masas de aire y aplicar las decisiones oportunas para el cuidado de la población. Las retrotrayectorias del modelo, combinadas con imágenes de satélite (por ejemplo, de los satélites MODIS de la NASA), pueden proporcionar información sobre si los altos niveles de contaminación del aire son causados por fuentes locales de contaminación del aire o si un problema de contaminación del aire fue arrastrado por el viento.

Casos de estudio

Erupción del volcán Cumbre Vieja

En este caso de estudio se estimaron las posibles trayectorias y dispersiones de los contaminantes emitidos por el volcán, para verificar las posibles afectaciones de este evento sobre la provincia de La Habana. Se analizaron las trayectorias y dispersiones en 24 horas para los días 19 de septiembre, 1 de octubre, 1 de noviembre y 1 de diciembre; todos del año 2021.

Se realizaron corridas de trayectoria y dispersión cada 10 días desde el inicio de la erupción para ver si las masas de aire afectaban la zona de estudio. Se implementó para la meteorología los datos globales del modelo Sistema de Pronóstico Global (GFS). Y finalmente se utilizaron 3 alturas iniciales para la corrida del modelo: 500 m, 1000 m y 1500 m.

CTE Ernesto Che Guevara

Para este caso se estimaron las posibles trayectorias y dispersiones de los contaminantes desprendidos por la termoeléctrica, para evaluar las afectaciones de las emisiones en La Habana. Se analizaron las trayectorias y dispersiones para el día 15 de octubre de 2022 en 24 horas; fecha en la que la central se encontraba trabajando al máximo con sus tres unidades. Se analizaron las trayectorias para tres alturas en 72 horas, y cada 6 horas en 24 horas para 500 m. De igual forma fueron consideradas las trayectorias cada 6 horas en 24 horas para 100 m, 500 m y 1000 m.

Para la meteorología se utilizaron los datos del modelo GFS.

Mediciones in situ

En el año 2019 fue realizada una campaña en la estación de Cubaenergía. Para las mediciones de PM realizadas fue utilizado el muestreador de bajo volumen con cabezales de cortes independientes para el muestreo de las partículas PM_{2.5} y PM₁₀: TCR TECORA ECHO PM. Dicho equipo cumple con los procedimientos de muestreo regulados por las normas europeas UNE EN 12341: 1999 y UNE EN 14907: 2006, para el monitoreo de partículas PM_{2.5} y PM₁₀ respectivamente.

En las mediciones fueron utilizados un total de 42 filtros para ambos tipos de partículas con el fin de determinar las concentraciones de estas y apreciar qué días excedían los límites diarios establecidos según las normas cubanas. Para este caso se calcularon las retrotrayectorias y frecuencias de retrotrayectorias, para determinar la procedencia de las partículas colectadas en el sitio de muestreo, principalmente aquellas de origen regional, y de esta manera comprobar la existencia de eventos regionales o locales, además de fuentes fuera de las existentes normalmente (Figura 2), que pudieran incidir en las concentraciones elevadas de PM obtenidas para esos días.

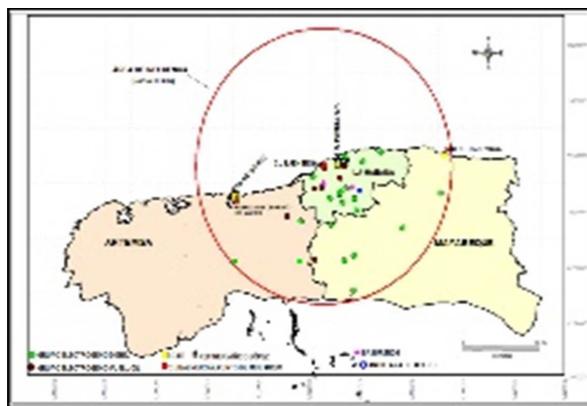


Figura 2. Fuentes de contaminación influyentes sobre la estación de CUBAENERGÍA para un radio de 50 Km

Para este caso se analizaron retrotrayectorias y frecuencia de retrotrayectorias para 72 horas que tuvieron como punto final el sitio Cubaenergía para los días donde las concentraciones de PM excedieron los límites diarios establecidos por las normas cubanas. Y para la meteorología se utilizaron los datos del modelo Sistema global de Asimilación de Datos (GDAS).

Datos satelitales

Fueron descargadas imágenes de la plataforma Copernicus, correspondientes a las columnas de dióxido de azufre (SO₂) (European Union's Space programme,

2023a) captadas por el sensor TROPOMI del satélite Sentinel 5P (European Union's Space programme, 2023b).

De igual forma se obtuvieron imágenes para el espesor óptico. Estas fueron captadas por el sensor Modis, del satélite Aqua, descargadas todas de la plataforma Giovanni NASA (NASA, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados para caso de estudio de erupción del volcán Cumbre Vieja

En la Figura 3 y la Figura 4 se muestran las posibles trayectorias obtenidas por el modelo Hysplit, que seguían las cenizas expulsadas durante la erupción para 24 horas y cada 10 días respectivamente.

Para la totalidad de los días analizados las trayectorias presentan direcciones Este-Oeste aproximadamente, excepto para las semanas del 19 al 28 de septiem-

bre de 2021, del 29 de octubre al 8 de noviembre de 2021 y del 19 de noviembre al 28 de noviembre de 2021, donde las masas de aire siguen direcciones Este-Noreste aproximadamente (Figura 4). Todos estos contaminantes sobrepasaron las alturas iniciales que utilizó el modelo en su cálculo y viajaron principalmente sobre los 1500 m de altura.

En la Figura 5 se obtuvo la posible dispersión que presentaban las cenizas expulsadas en la erupción del volcán Cumbre Vieja, para 24 horas, a partir de los días 19 de septiembre, 1 de octubre, 1 de noviembre y 1 de diciembre.

Fueron estimadas 1000 toneladas por día basado en publicaciones de la prensa internacional. Utilizando como altura sobre el nivel del mar del volcán 6114 pies.

Las mayores concentraciones se estimaron al suroeste de la isla con valores de 1 mg/m^3 y se dirigen hacia el oeste con respecto a la fuente de emisión.

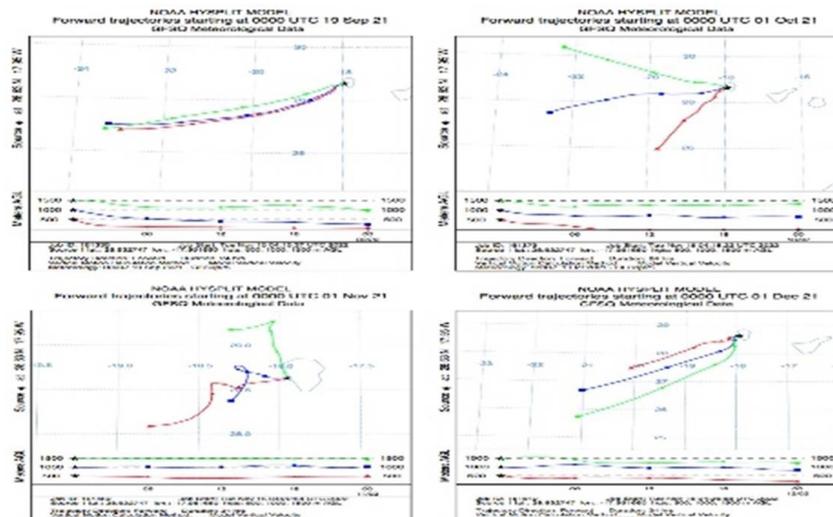


Figura 3. Salidas del modelo de trayectoria Hysplit para 24 horas (partiendo de los días 19 de septiembre 2021, 1 de octubre de 2021, 1 de noviembre de 2021 y 1 de diciembre de 2021)

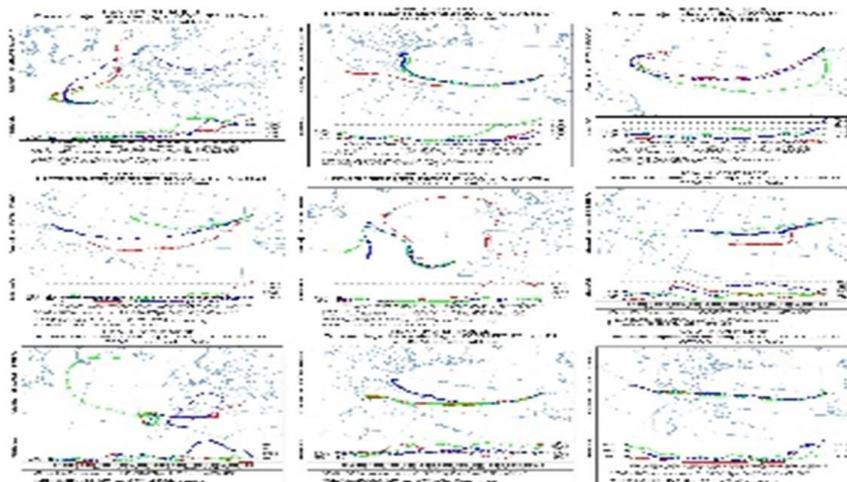


Figura 4. Salida del modelo de trayectoria Hysplit cada 10 días (a partir del 19 de septiembre de 2021)

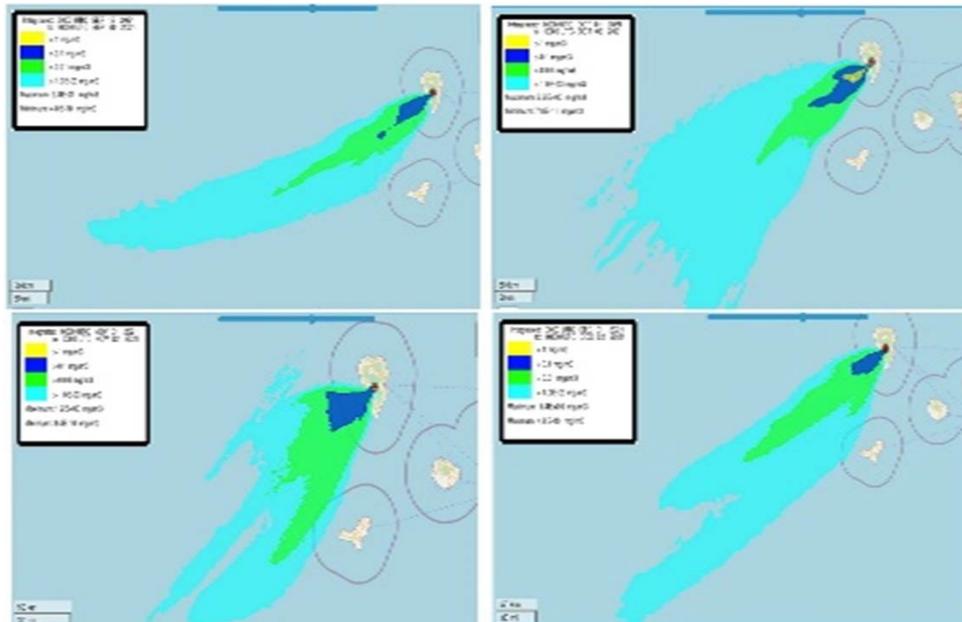


Figura 5. Salidas del modelo de dispersión

En las dispersiones analizadas se puede observar la llegada de la pluma de cenizas y demás contaminantes expulsados hasta el norte de África y el Caribe, coincidentemente con los modelos de trayectoria anteriormente presentados para este caso, en direcciones Este-Oeste mayormente.

Resultados para caso de estudio Central Termoeléctrica Ernesto Che Guevara.

Como se puede observar en la Figura 6, las salidas del modelo de trayectoria para el día 15 de octubre

de 2022, la pluma de contaminantes expulsados por la CTE Ernesto che Guevara, en todos los casos se mueve en dirección Oeste.

Se obtuvo la posible dispersión que presentaban los contaminantes expulsados por la CTE Ernesto Che Guevara para el día 15 de octubre 2022, para dos horarios de máxima emisión 0500 UTC y 1400 UTC. (Figura 7)

Se estimaron las emisiones de la CTE, considerando factores de emisión obtenidos. Las mayores concentraciones se registraron hacia el oeste de la fuente de emisión, con valores inferiores a 0,01 mg/m³.

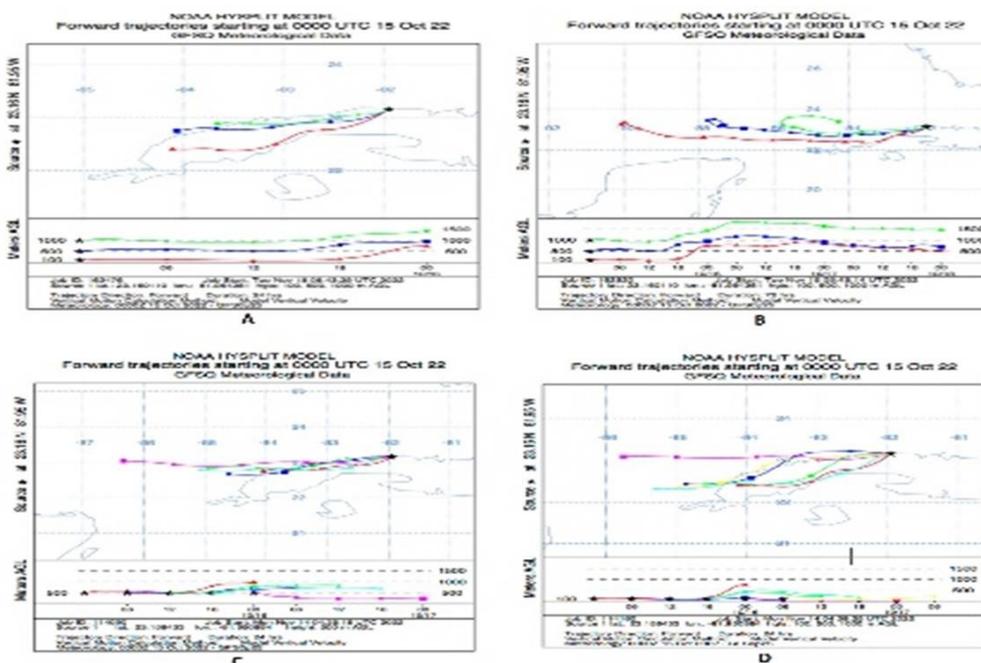


Figura 6. Salidas del modelo de trayectoria

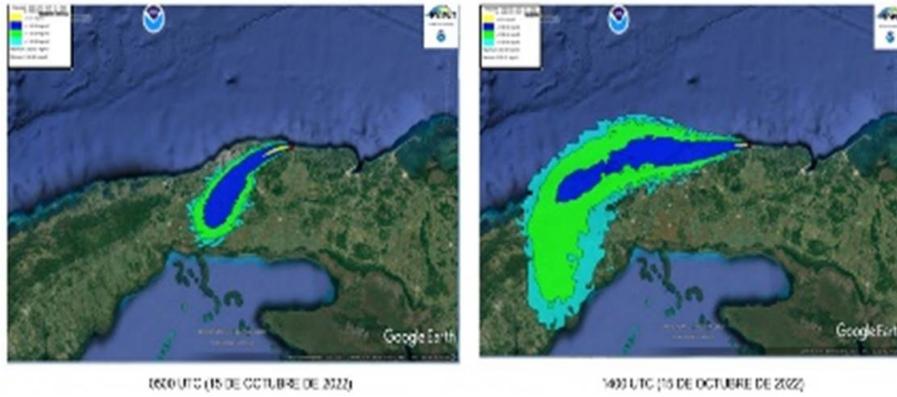


Figura 7. Salida del modelo de dispersión

Caso de estudio de datos in situ recopilados en la estación de CUBAENERGÍA

Con los datos que fueron recogidos de las mediciones realizadas en la estación de CUBAENERGÍA se realizaron los siguientes gráficos:

Los días que excedieron las normas cubanas establecidas de PM2.5 (50 µg/m³) y PM10 (25 µg/m³),

así como los valores de las concentraciones correspondientes se arrojan en las siguientes tablas:

Tabla 1. Concentraciones diarias de PM10

Fecha	Norma	# Filtro	Concentraciones PM ₁₀ (µg/m ³)
7/6/19	50	F1-033	125,60
17/7/19	50	F1-064	141,66
6/8/19	50	F1-081	134,89
15/8/19	50	F1-088	144,42

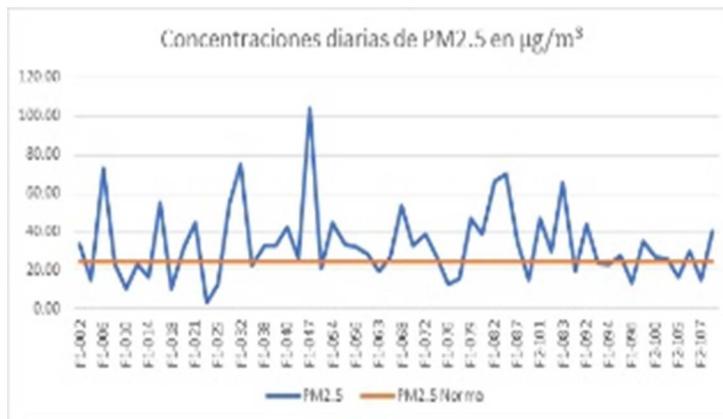


Gráfico 1. Concentraciones diarias de PM2.5 en µg/m³

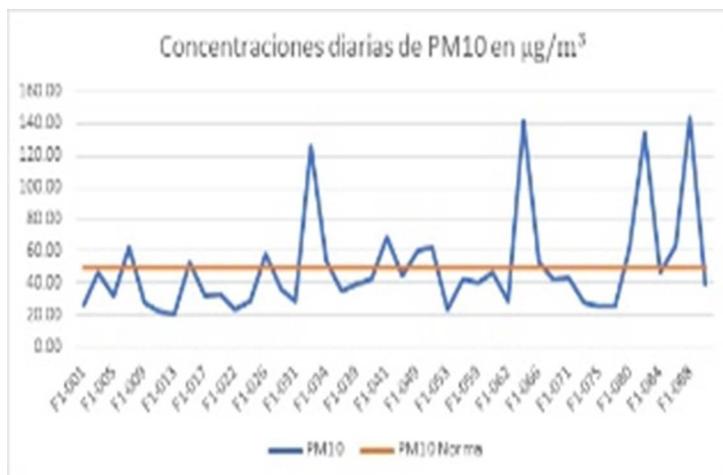


Gráfico 2. Concentraciones diarias de PM10 en µg/m³

Tabla 2. Concentraciones diarias de PM2.5

Fecha	Norma	# Filtro	Concentraciones PM _{2.5} (µg/m ³)
7/5/19	25	F1-006	73,44
15/5/19	25	F1-016	55,48
7/6/19	25	F1-032	75,51
26/6/19	25	F1-047	104,52

Seguidamente para dichas fechas se analizaron las retro trayectorias (Figura 8) y sus frecuencias (Figura 9) para analizar la procedencia de estos contaminantes.

En este caso la frecuencia de trayectoria inició una trayectoria desde una sola ubicación (CUBAENERGÍA) y altura cada 6 horas para 6 días, y luego sumó

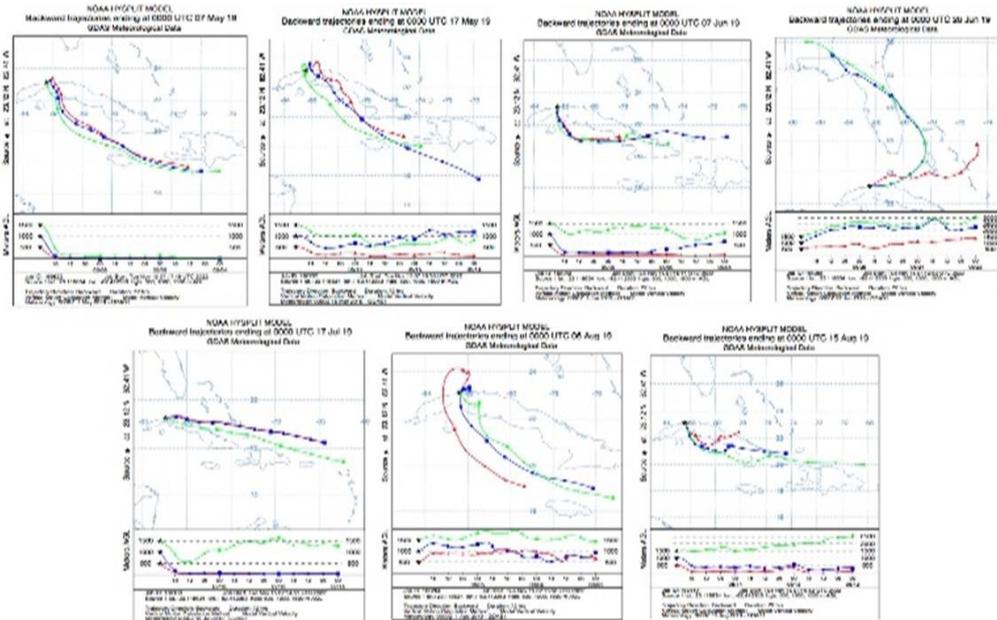


Figura 8. Salidas del modelo de retro trayectoria Hysplit para los días excedentes de la norma de concentraciones PM10 y PM2.5

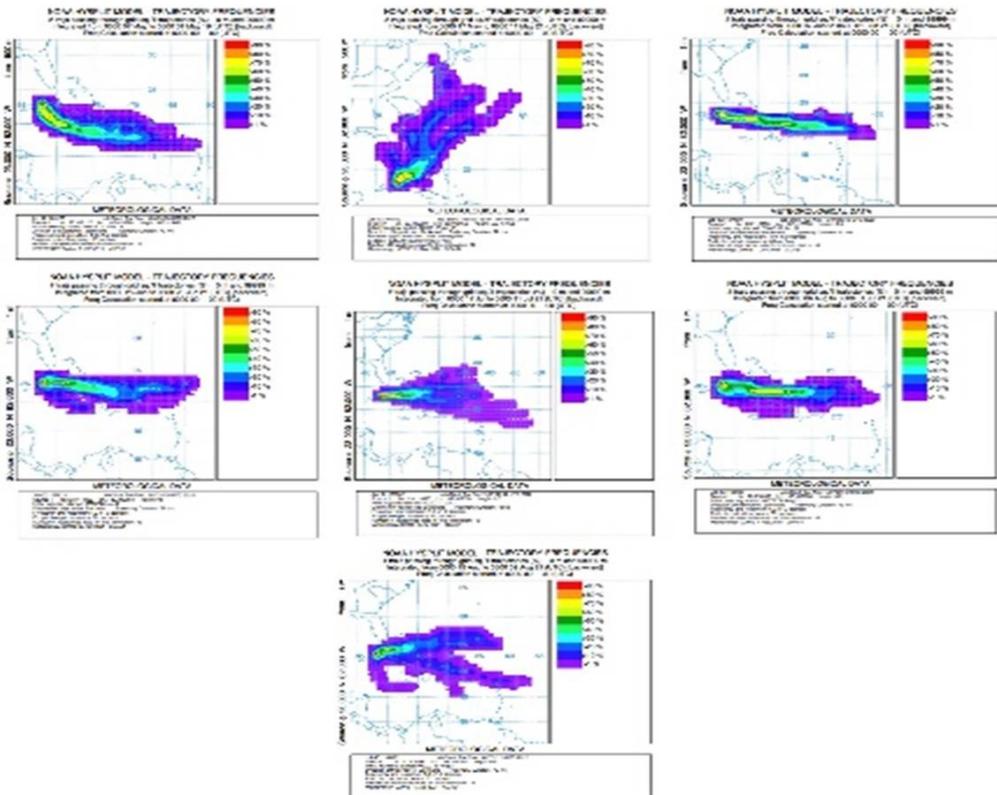


Figura 9. Frecuencia de retro trayectoria

la frecuencia con que la trayectoria pasó por dicha ubicación. En el caso de las retrotrayectorias solamente fueron calculadas para 72 horas, por tal motivo no existe una coincidencia exacta entre las direcciones que muestra el modelo de trayectoria y las frecuencias de trayectoria, específicamente para los días 17 de mayo del 2019, donde las frecuencias de trayectoria indica direcciones del Norte y para el día 26 de junio del 2019, donde indica direcciones del Este.

Resultados de los datos satelitales

Erupción del volcán Cumbre Vieja

De la plataforma Copernicus, captadas por el sensor Tropomi del satélite Sentinel 5P, se obtuvo la densidad de la columna de dióxido de azufre expulsada por el volcán Cumbre Vieja. Fueron analizados los días 19 de septiembre (Figura 10.a), 26 de septiembre (Figura 10.b), 1 de octubre (Figura 10.c), 8 de octubre (Figura 10.d), 1 de noviembre (Figura 10.e), 8 de noviembre (Figura 10.f), 1 de diciembre (Figura 10.g) y 8 de diciembre (Figura 10.h).

En la Figura 11, de la plataforma Giovanni NASA se puede apreciar el espesor óptico (AOD) captado por el sensor Modis del satélite Aqua, entre los meses septiembre 2021 a diciembre 2021. En ellas resalta la dispersión provocada por una nube de polvo del Sahara en estos meses.

CTE Ernesto Che Guevara

La Figura 12 muestra una imagen de AOD captada por el Modis-Aqua para el 15 de octubre de 2022. En

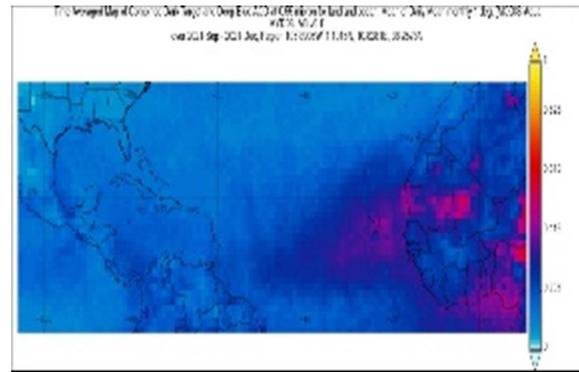


Figura 11. Acumulado de AOD (septiembre 2019 - diciembre 2019)

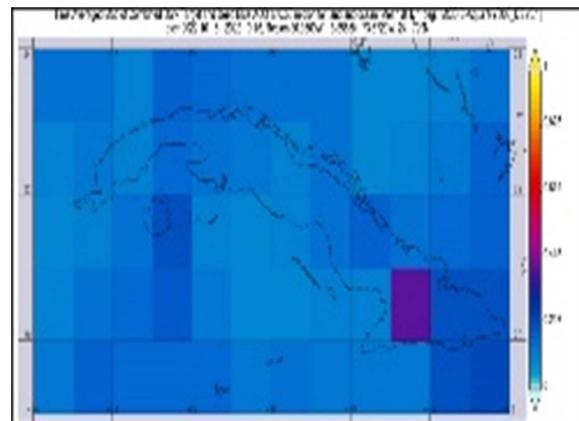


Figura 12. AOD (15 de octubre de 2022)

la misma se observa las mayores concentraciones de partículas hacia la zona oriental, no siendo así para la provincia de La Habana, donde las concentraciones no fueron significativas.

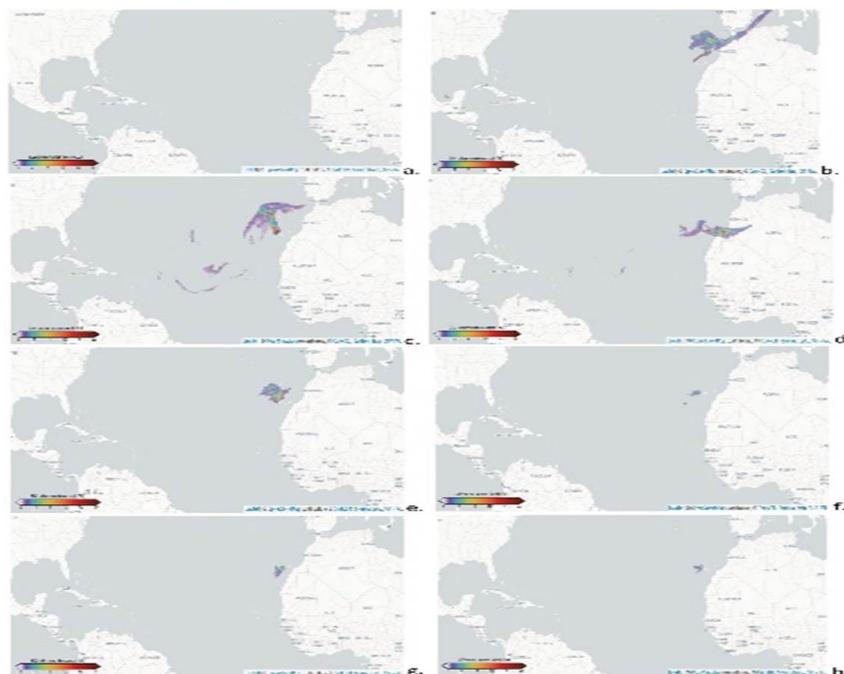


Figura 10. Densidad de la columna de dióxido de azufre expulsada por el volcán Cumbre Vieja

Datos in situ de la estación de Cubaenergía

En este caso de estudio solo resultó significativo la influencia de una nube de polvo del Sahara en las mediciones de junio de 2019, un evento muy característico en esta época del año, como se muestra en la [Figuras 13](#), tomadas del satélite Sentinel, en la plataforma Copernicus.

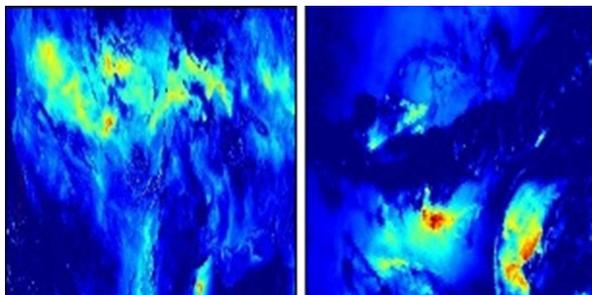


Figura 13. Nube de polvo del Sahara, Sentinel (junio 2019)

Comparación de las salidas del modelo con las imágenes satelitales

El cálculo de las trayectorias, dispersión y retrotrayectorias en combinación con imágenes satelitales y mediciones in situ ayuda al diagnóstico de la contaminación, aportando una visión global de la zona de estudio, indicando la fuente de la contaminación y las zonas afectadas donde se deben implementar las medidas de prevención y control.

En el caso de la erupción del Volcán Cumbre Vieja gracias a la correspondencia que existe entre las imágenes satelitales y la salida del modelo de trayectoria para 10 días, se puede observar que en la semana correspondiente al 29 de septiembre de 2021 hasta el 8 de octubre de 2021 debe ocurrir la llegada a Cuba, y a territorio habanero, de la pluma de cenizas. Esta conclusión debida a que el Hysplit es un modelo lagrangiano que calcula los movimientos de las masas de aire en el tiempo.

Se puede constatar la llegada del gas y la pluma de contaminantes a Cuba sobre los días 4 y 5 de octubre de 2021 trasladada por una nube de polvo del Sahara, donde fue predominante sobre nuestro país y sobre territorio habanero la existencia de partículas.

Teniendo en cuenta las alturas que se utilizaron para el cálculo de las trayectorias, se estimó la mayor concentración de contaminantes sobre los 1,5 Km de altura, pero los mismos, debido a la situación sinóptica de los vientos que se encontraban en dirección Noreste-Este, la provincia de la Habana no fue una de las más afectadas por este evento regional.

Para la CTE Ernesto che Guevara, como se observó en la [Figura 6](#), todas las trayectorias que se realizaron constatan que las masas de aire se desplazan mayormente en direcciones Oeste-Noroeste, y como se observa en la imagen satelital ([Figura 12](#)), no existe

gran concentración de partículas sobre la provincia de La Habana para la fecha del 15 de octubre 2022. Con estas comparaciones se observa que para dicha fecha no existe un gran evento de contaminación afectando a La Habana proveniente de esta ubicación. No se descarta, sin embargo, su aporte a la contaminación reinante en la provincia de La Habana.

Con respecto a las mediciones in situ, en este caso se encontró, como fue mencionado anteriormente, solamente la incidencia de un evento de polvo del Sahara en las mediciones de junio 2019, mientras que para el resto de los días que excedieron las normas establecidas para las concentraciones de material particulado se intuye la incidencia de otras fuentes de contaminación, como puede ser: la quema de combustibles fósiles, el alto nivel de tráfico vehicular o la salinidad presente en el ambiente, producto de los mares que rodean a Cuba.

CONCLUSIONES

1. Concluidas las comparaciones entre las salidas del modelo HYSPLIT y las imágenes satelitales obtenidas de las diferentes plataformas satelitales para cada uno de los casos de estudio, se concluyó que con respecto a la erupción del volcán Cumbre Vieja, en las Islas Canarias, que tuvo lugar el 19 de septiembre de 2021, la provincia de La Habana no sufrió grandes afectaciones debido a este evento.
2. El 15 de octubre de 2022, donde se estudió el comportamiento de las emisiones de la CTE Ernesto Che Guevara se constató que no constituye para dicha fecha un gran evento de contaminación para la zona de estudio, ya que las concentraciones no alcanzan la misma.
3. El uso del modelo de retrotrayectorias para el análisis de los datos in situ recopilados de la estación de CUBAENERGÍA, arrojó la existencia de 7 días que superaron las normas establecidas de acuerdo a la NC 1020: 2014 para concentraciones de PM. Solo destacó la intrusión de una nube de polvo del Sahara en las mediciones de junio del 2019.
4. Las comparaciones realizadas entre el modelo y las imágenes satelitales, se pudo monitorear la contaminación existente en la provincia de La Habana.

REFERENCIAS

- Díaz Rizo, O., Olivares Rieumont, S., Rudnikas, A. G., D'Alessandro Rodríguez, K., Lima Cazorla, L., García Céspedes, D., Casanova Díaz, A. O., García Trápaga, C., y Manduca Artilles, M. (2019). Estudios de contaminación ambiental en La Habana mediante técnicas nucleares y conexas. *Nucleus*, 66, 58-65. <http://nucleus.cubaenergia.cu/index.php/nucleus/article/view/693>
- European Union's Space programme(2023). *Copernicus Sentinel-5P data products*. Sentinel

- Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products>
- European Union's Space programme(2023). *Sentinel-5P*. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- García Reynoso, J. A. (2010). Modelación de la Calidad del aire. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiowLncrSCAxU2FlkFHxQ_A9cQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sica.int%2Fbusqueda%2Fbusqueda_archivo.aspx%3FArchivo%3Dodoc_72907_1_01102012.pdf&usg=AOvVaw1593cHiIVfH-VpiUaKTT7X&opi=89978449
- Gutiérrez Quintero, V., Meneses Ruiz, E., Roig Rassi, A., Guevara Luna, M. A., y Belalcazar, L. C. (2021). Empleo de datos satelitales para estimación de contaminación atmosférica por material particulado en La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 27(1). <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/550/1045>
- Herrero Anta, S. (2019). *Caracterización de las propiedades ópticas y microfísicas de tres tipos de aerosoles atmosféricos durante tres eventos de alta turbiedad en Castilla y León* [Trabajo fin de Grado en Física, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/40254>
- HYSPLIT. (s.f). Air Resources Laboratory. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit>
- NASA. (2023). Giovanni. <https://www.usillife.pe/investigacion-y-desarrollo/web-giovanni-nasa/>
- Oficina Nacional de Normalización. (2014). *Calidad del aire — Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas*. (NC 1059:2014). <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSITARIA%20DEL%20ISDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2014/NC%201059%20a2014%2081p%20haci.pdf>
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., y Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1>