

Evaluación del WRF como herramienta para la obtención de datos meteorológicos necesarios en estudios ambientales con AERMOD



<https://cu-id.com/2377/v29n3e06>

Evaluation of the WRF as a tool to obtain the necessary meteorological data in environmental studies with AERMOD

 Flavia Gutiérrez Muiña*, Raulien A. Fernández Torres, Jorge Alvarado Cartaya**,
 Elieza Meneses Ruiz***,  Alina Roig Rassi****

Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGIA, La Habana, Cuba

RESUMEN: Para caracterizar el comportamiento de la contaminación atmosférica en un área determinada a partir del modelo de dispersión AERMOD, es necesario tener en cuenta las características del terreno y las condiciones del tiempo, estas últimas son obtenidas, generalmente, en estaciones meteorológicas. Sin embargo, en ocasiones, estos datos pueden presentar problemas como: no ser representativos del lugar, tener un costo elevado o existencia de datos faltantes; lo que ha provocado que se realicen numerosos intentos por estimarlos a partir de modelos numéricos. En el presente trabajo se evalúa al WRF como herramienta alternativa para la obtención de datos meteorológicos necesarios en estudios de impacto ambiental. Para la realización del estudio se cuenta con sus salidas numéricas para 2 fuentes y las variables meteorológicas medidas en una estación correspondientes a los primeros 10 días del mes de marzo del 2014. Dentro de los resultados vemos que, las concentraciones obtenidas a partir de datos modelados tienden a ser ligeramente superiores a las que se obtienen de datos medidos, lo cual no afecta los estudios de impacto ambiental, por el contrario, permite tener un mayor cuidado a la hora de establecer medidas o protocolos relacionados con las concentraciones máximas admisibles y la calidad del aire.

Palabras claves: estudios de impacto ambiental, variables meteorológicas, modelo numérico.

ABSTRACT: To characterize the behavior of the atmospheric contamination in a given area from the AERMOD dispersion model, it is necessary to take into account the characteristics of the terrain and the weather conditions, the latter being generally obtained at meteorological stations. However, sometimes these data can present problems such as: not being representative of the place, having a high cost or missing data; which has caused numerous attempts to estimate them from numerical models. In the present work, the evaluation of the WRF is carried out as an alternative tool to obtain the necessary meteorological data in environmental impacts studies with the AERMOD dispersion model. To carry out the study, the numerical outputs of the WRF are available for 2 source (Diesel Battery of Cruces and Diesel Generator Sets of Junco Sur) and with the meteorological variables measured at the Cienfuegos station corresponding to the first 10 days of the month of March of 2014. Within the results, we see that the concentrations obtained from modeled data tend to be slightly higher than those obtained from measure data, which does not affect the environmental impact studies, on the contrary, it allows to have a greater be careful when establishing measures or protocols related to maximum admissible concentrations and air quality.

Keywords: environmental impact studies, meteorological variables, numerical model.

*Autor para correspondencia: Flavia Gutiérrez Muiña. E-mail: flavia@cubaenergia.cu

** alvarado@cubaenergia.cu

*** emeneses@cubaenergia.cu

**** arrassi@cubaenergia.cu

Recibido: 03/03/2023

Aceptado: 25/06/2023

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflicto de intereses

Contribución de los autores: Flavia Gutiérrez Muiña: **Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción - borrador inicial.** Raulien A. Fernández Torres: **Investigación, Metodología, Recursos, Visualización.** Jorge Alvarado Cartaya: **Metodología, Recursos, Supervisión, Validación.** Elieza Meneses Ruiz: **Administración de proyecto, Conceptualización, Metodología.** Alina Roig Rassi: **Conceptualización, Metodología, Redacción - revisión y edición.**

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

En la actualidad la contaminación atmosférica es uno de los problemas más importantes referentes al medio ambiente que enfrenta la humanidad tanto a escala global, regional como local. Dentro de sus causas principales se encuentran las actividades antropogénicas como la producción de energía, el transporte y el sector industrial.

La contaminación atmosférica se define como la situación en la cual las sustancias que son resultado de actividades antropogénicas presentan concentraciones suficientemente superiores al nivel normal que debe existir en el ambiente, provocando efectos medibles e indeseables para la salud humana y otros elementos del medio ambiente como animales, vegetación y ecosistemas (Turtos, Capote, & Fonseca, 2013). Es consecuencia tanto de la emisión directa de contaminantes primarios de fuentes naturales y antropogénicas, como de los contaminantes secundarios formados en la propia atmósfera por la interacción de los primarios (Sierra, 2014).

El nivel de concentración de estos contaminantes puede ser determinado por dos vías fundamentales: las mediciones y las estimaciones a través de modelos (Sierra, 2014). Esta última es de gran importancia para aquellos países donde se dificultan las posibilidades reales para la evaluación y control sistemático de la contaminación atmosférica mediante mediciones; por lo que, generalmente, los estudios de calidad del aire se realizan utilizando modelos simples o más complejos como: Beryland, SCREE3, ISCST3, CALPUFF o AERMOD.

La modelación de la calidad del aire en un área determinada es una herramienta físico - matemática que permite simular las condiciones reales de transporte y dispersión de los contaminantes a partir de la interacción de las características del terreno, las condiciones propias de las fuentes de emisión y las condiciones del tiempo (Grisales Vargas, Cubaque López, & Agudelo Cadavid, 2016), estas últimas son obtenidas, generalmente, en estaciones meteorológicas. En ocasiones estos datos presentan problemas como:

- No son representativos del lugar donde se realiza el estudio de calidad debido a su lejanía con respecto a la estación;

- Las entidades que los proporcionan lo hacen a un costo elevado;
- Pueden existir datos faltantes, lo cual puede estar relacionado con algún fallo de determinado instrumento de medición.

La problemática con los datos meteorológicos medidos en estaciones es bastante generalizada, lo que ha provocado su estimación a partir de modelos numéricos como el WRF (*Weather Research and Forecast*), cuyas salidas se emplean en este estudio como datos de entrada en el modelo de dispersión AERMOD mediante el uso del acople MMIF (*Mesoscale Model Interface Program*), necesario para convertir el pronóstico meteorológico (.NetCDF) en parámetros y formatos necesarios para la entrada al modelo de dispersión (.sfc y .pfl) (EPA, 2018).

Por tanto, el objetivo central es evaluar la factibilidad del WRF como herramienta alternativa para la obtención de datos meteorológicos necesarios para realizar evaluaciones de impacto ambiental con el modelo de dispersión AERMOD. Para ello se realiza una comparación entre los datos meteorológicos medidos en una estación con respecto a los estimados por el WRF para 2 fuentes puntuales; así como también, se comparan las concentraciones simuladas por el AERMOD a partir de datos meteorológicos medidos en la estación y estimados por el modelo para cada una de las fuentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del estudio se cuenta con los valores de 3 variables meteorológicas medidas en la estación de referencia (temperatura superficial, dirección y velocidad del viento a 10 m de altura), correspondientes a los primeros 10 días del mes de marzo del año 2014.

Por otra parte, se seleccionaron 2 fuentes de emisión (catalogadas como puntuales), las cuales se localizan a 7 y 30 km de dicha estación meteorológica. La primera corresponde a un Grupo Electrógeno y la segunda a una Batería Diesel; en ambos casos los motores trabajan entre un 75 y 85 % de su potencia. Las características específicas de cada fuente, requeridas para la modelación, se describen en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Características de las fuentes puntuales

Parámetros	Fuente # 1 (7 km de la estación)	Fuente # 2 (30 km de la estación)
Cantidad de motores	16 motores MTU serie 4000	8 motores MTU serie 4000
Diámetro de la chimenea	0.46 m	0.46 m
Altura de la chimenea	4.57 m	4.7 m
Área de la chimenea	0.17 m ²	0.17 m ²
Velocidad de salida del gas	≈23.07 m/s	≈26.71 m/s
Temperatura del gas	384.7°C	390.24°C

Funciones estadísticas y valores de referencia

El análisis estadístico es el método más común para determinar la incertidumbre de los valores estimados por un modelo, los cuales son comparados directamente con observaciones. En el caso particular de este estudio se evalúan los datos meteorológicos modelados por el WRF a partir de funciones estadísticas sencillas: error medio absoluto (MAE) y error cuadrático medio (RMSE).

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|M_i - O_i|}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Donde:

M_i : valor estimado por el modelo WRF

O_i : valor observado (medido en la estación de referencia)

N: número de valores analizados

Ambos estadígrafos tienen un margen de tolerancia $\leq 2^\circ\text{C}$, $\leq 2 \text{ m/s}$ y $\leq 30^\circ$ para la temperatura, velocidad y dirección del viento respectivamente (Turtos, Capote, & Fonseca, 2013); aunque estos valores no son definitivos, pueden variar dependiendo de la situación.

Recopilación y procesamiento de la información

Modelo numérico WRF

The Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo de simulación de la atmósfera diseñado para la investigación y aplicaciones operativas. Consiste en un sistema numérico de mesoescala utilizado en la investigación de los procesos atmosféricos y en la predicción del tiempo; cuenta con dos núcleos dinámicos (el ARW y el NMM), un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que permite la programación en paralelo y la extensibilidad del sistema (National Center for Atmospheric Research, 2015); es muy versátil y posee una amplia gama de aplicaciones meteorológicas través de escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros.

El WRF fue desarrollado como parte de una colaboración entre: el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), la Agencia de

Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval (NLR) y la Administración Federal de Aviación (FAA) (Verde, 2014).

Dentro de sus aplicaciones se encuentra el empleo de sus salidas numéricas como datos de entrada en modelos de dispersión como el AERMOD, lo cual constituye una solución a los problemas que pueden presentar los datos meteorológicos provenientes de estaciones. En este tipo de estudio el modelo numérico permite simular con mayor precisión los procesos atmosféricos que ocurren en un área específica.

Para la obtención de campos meteorológicos mediante el WRF con fines de calidad de aire, es necesario tener en cuenta (EPA, 2019): la definición del dominio de modelación, el cual debe tener un tamaño y resolución suficientes para capturar adecuadamente las características de mesoescala que impactan la ubicación de la fuente; así como las parametrizaciones físicas de los fenómenos que ocurren a escalas menores que la del modelo.

En el caso particular de este estudio:

- Se emplea el modelo numérico WRF en su versión 3.9.1.1 con el núcleo dinámico ARW.
- En las condiciones iniciales y de contorno se introducen valores cada 6 horas, los cuales se han obtenido del *Global Forecast System* (GFS).
- Se seleccionan tres dominios anidados: un dominio externo con resolución de 9 km; un segundo dominio con resolución de 3 km y un tercer dominio con resolución de 1 km. El centro se localiza de manera tal que coincida con el emplazamiento de cada fuente. Es importante aclarar que se trabaja con las simulaciones numéricas del dominio 3 ya que permite tener una mejor precisión de los datos meteorológicos debido a su resolución de 1 Km, lográndose así una mayor exactitud en las concentraciones de los contaminantes modelados por el AERMOD.

Las parametrizaciones físicas empleadas se reflejan en la [Tabla 2](#).

Acople MMIF

La ejecución del AERMOD a partir de las salidas numéricas del modelo WRF no es un proceso directo

Tabla 2. Parámetros físicos empleados en las corridas del WRF

Parámetros físicos	Esquemas utilizados
Microfísica	Thompson aerosol - aware (28)
Capa límite planetaria (PBL)	Yonsei University scheme (1)
Radiación de onda larga	RRTMG scheme (4)
Radiación de onda corta	RRTMG scheme (4)
Modelo de superficie	Noha Land Surface Model (2)
Capa atmosférica superficial	MM5 similarity (1)
Parametrización de Cúmulos	Betts - Miller - Janjic scheme (2)

ya que se requiere del empleo del programa MMIF, el cual sirve de acople entre ambos modelos.

Según la (EPA, 2019), el MMIF (*Mesoscale Model Interface Program*) (Figura 1) convierte el pronóstico meteorológico (campos de salida) en parámetros y formatos necesarios para la entrada directa a modelos de dispersión como el CALPUFF (único modelo que soportaba el programa en su primera versión), así como el AERMOD y el SCICHEM, los cuales fueron añadidos a partir de la versión 2.



Figura 1. Flujo de trabajo del acople MMIF (EPA, 2018)

El MMIF puede (EPA, 2018): actuar como un reemplazo de AERMET, pre-procesador de datos meteorológicos; generar datos adecuados como entrada para AERMET o generar datos para AERCOARE (alternativa para modelar dispersión sobre agua).

En este caso se considera la primera variante (sustitución del AERMET), para lo cual el programa produce 3 archivos: .Useful Info, .sfc y .pfl. El archivo Useful Info es un archivo de texto con algunas líneas necesarias para el modelo de dispersión. Por su parte, el .sfc constituye un archivo de superficie e incluye parámetros como: hora, flujo de calor sensible (W/m^2), parámetro de escala de la velocidad del viento Monin - Obukhov (m/s), escala de velocidad convectiva (m/s), albedo (fracción), velocidad y dirección del viento a 10 m (m/s y grados respectivamente), temperatura del aire a 2 m (K), entre otros. El último archivo de salida es el .pfl (archivo de perfil) (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), el cual contiene: hora, altura medida (m), altura del último nivel (m), dirección del viento (grados), velocidad del viento (m/s), temperatura del aire ($^{\circ}C$) y otros dos parámetros que generalmente faltan en el MMIF y se representan con "99" (EPA, 2019).

Modelo de dispersión AERMOD

El modelo AERMOD, avalado por la *Environmental Protection Agency* (US - EPA), es un modelo de dispersión gaussiana que permite simular las emisiones de diferentes fuentes (puntuales, de área y de volumen) que se encuentran a nivel del suelo y por encima de este, así como su dispersión en la atmósfera, teniendo en cuenta ecuaciones que describen el comportamiento turbulento de la capa límite y la influencia topográfica de la zona (EPA, 2018). Así, este modelo representa una herramienta útil para el diagnóstico de la contaminación atmosférica a través de la predicción de niveles de concentración de contaminantes, incor-

porando las emisiones asociadas a diferentes tipos de fuentes y la dinámica atmosférica (Coronado, 2019).

Este modelo cuenta con dos preprocesadores principales de datos de entrada que son componentes regulatorios del sistema (EPA, 2018). El primero es el *Meteorological Data Preprocessor* (AERMET), que verifica y distribuye la información asociada a las variables meteorológicas a lo largo de la capa de mezcla, en la que tienen lugar los procesos de mezclado y dispersión de los contaminantes a través de mecanismos convectivos (principalmente durante ciclo diurno) o mecánicos (principalmente durante el ciclo nocturno). El otro preprocesador es el *Terrain Preprocessor* (AERMAP), que se encarga de procesar las características de terreno, topografía, receptores y mallas de modelamiento (Coronado, 2019).

RESULTADOS

Comparación y evaluación de los datos meteorológicos

La Figura 2 muestra los datos de entrada (.pfl) al modelo de dispersión AERMOD durante las primeras 6 horas del día 1^{ro} de marzo del 2014. La primera columna que se encuentra dentro del recuadro azul corresponde a la dirección del viento (en grados), la segunda a la velocidad (en m/s) y la tercera a la temperatura (en $^{\circ}C$). Mientras que las Figura 3 y Figura 4 muestran las gráficas comparativas de los datos modelados por el WRF con respecto a los medidos en la estación durante las 24 horas del día 1ro de marzo del 2014.

A	14 3 1 1 10.0 1	29.0	1.00	19.10	99.00	99.00
	14 3 1 2 10.0 1	29.0	1.00	18.80	99.00	99.00
	14 3 1 3 10.0 1	28.0	1.00	18.40	99.00	99.00
	14 3 1 4 10.0 1	27.0	1.00	18.10	99.00	99.00
	14 3 1 5 10.0 1	34.0	0.50	18.00	99.00	99.00
	14 3 1 6 10.0 1	28.0	0.50	18.00	99.00	99.00
B	14 3 1 1 10.0 1	38.5	2.14	19.30	99.00	99.00
	14 3 1 2 10.0 1	40.2	2.19	19.00	99.00	99.00
	14 3 1 3 10.0 1	40.1	2.24	18.67	99.00	99.00
	14 3 1 4 10.0 1	39.6	2.30	18.34	99.00	99.00
	14 3 1 5 10.0 1	39.6	2.36	18.00	99.00	99.00
	14 3 1 6 10.0 1	38.8	2.44	17.69	99.00	99.00
C	14 3 1 1 10.0 1	29.7	1.86	18.56	99.00	99.00
	14 3 1 2 10.0 1	32.2	1.87	18.27	99.00	99.00
	14 3 1 3 10.0 1	33.7	1.92	17.97	99.00	99.00
	14 3 1 4 10.0 1	35.0	1.99	17.66	99.00	99.00
	14 3 1 5 10.0 1	35.9	2.07	17.37	99.00	99.00
	14 3 1 6 10.0 1	36.6	2.15	17.10	99.00	99.00

Figura 2. pfl obtenidos a partir de datos meteorológicos medidos en la estación (A) y modelados para la Fuente # 1 (B) y # 2 (C)

Las Tabla 3 y Tabla 4 muestran los promedios diarios para los 10 días analizados de las variables en estudio (dirección, velocidad del viento y temperatura); así como los valores de los estadígrafos aplicados (MBE y RMSE) para la evaluación de los resultados.

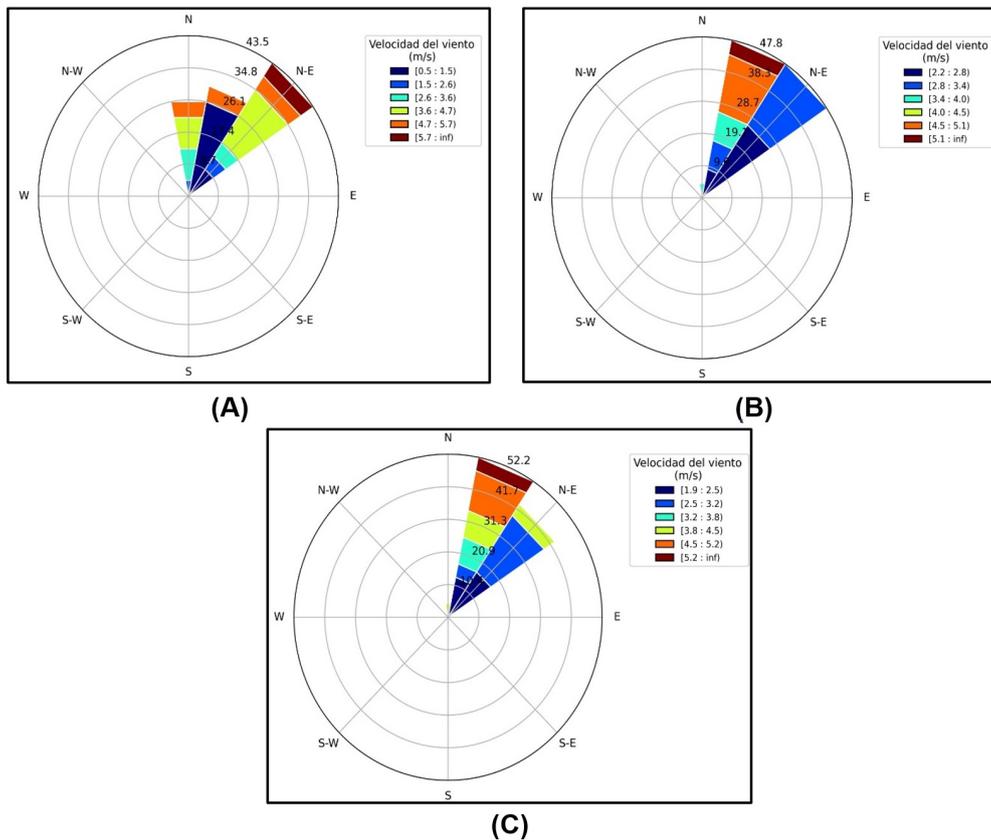


Figura 3. Rosa de los vientos de la estación meteorológica (A), Fuente # 1 (B) y Fuente # 2 (C)

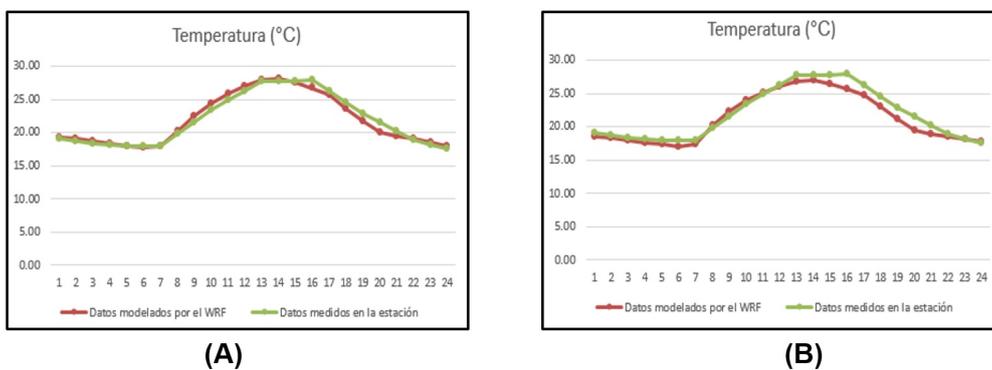


Figura 4. Comparación de las temperaturas modeladas para la Fuente # 1 (A) y # 2 (B) con respecto a las medidas en la estación meteorológica

Como puede observarse los valores estimados por el modelo (para las variables velocidad del viento y temperatura) muestran un comportamiento similar y se aproximan a los medidos en la estación meteorológica; sin embargo, en el caso de la dirección del viento, los valores se diferencian un poco más entre sí, aunque pueden considerarse aceptables, lo cual puede estar relacionado con: la influencia de factores locales propios de cada uno de los emplazamientos o las parametrizaciones físicas escogidas a la hora de correr el modelo WRF.

Para ambas fuentes, los valores de los estadígrafos MBE y RMSE se encuentran dentro del margen de tolerancia, no obstante, la Fuente # 1 muestra valores más cercanos a cero (valor óptimo), por lo cual las

variables modeladas en esta fuente se aproximan más a las medidas en la estación meteorológica.

Comparación de las concentraciones

Las Figura 5 Figura 6 muestran las zonas de afectaciones de la calidad del aire (salidas gráficas en 24 horas) debido a las emisiones emitidas a la atmósfera de CO, NO_x y SO₂, a partir de variables meteorológicas medidas en la estación (I) y estimadas por el WRF (II) para cada una de las fuentes.

Los valores modelados por el WRF tienden a ser ligeramente superiores a los medidos en la estación meteorológica, lo cual no afecta los estudios de impacto ambiental; por el contrario, permite tener un mayor

Tabla 3. Promedios diarios y valores de estadígrafos de las variables estudiadas para la Fuente # 1

Fuente # 1						
Días	Valores modelados			Valores medidos		
	Dirección	Veloc.	Tempe.	Dirección	Veloc.	Tempe.
01-mar	30.03	3.26	21.88	40.58	2.92	21.91
02-mar	48.6	3.52	21.37	32.92	2.24	21.94
03-mar	53.25	2.32	22	56.21	1.49	22.85
04-mar	102.68	1.49	22.53	91.88	0.84	23.57
05-mar	136.01	2.15	23.55	126.92	2.62	24.43
06-mar	167.17	3.06	24.05	136.04	2.25	24.57
07-mar	255.61	3.29	24.52	175.88	2.7	25
08-mar	63.2	2.5	22.7	104.9	2	23.4
09-mar	45.1	2.8	21.7	35.8	3	22.7
10-mar	86.5	1.74	21.67	67.4	1.6	22.4
	Dirección del viento		Velocidad del viento		Temperatura	
MBE	11.96		0.45		- 0.68	
RMSE	31.75		0.66		0.74	

Tabla 4. Promedios diarios y valores de estadígrafos de las variables estudiadas para la Fuente # 2

Fuente # 2						
Días	Valores modelados			Valores medidos		
	Dirección	Veloc.	Tempe.	Dirección	Veloc.	Tempe.
01-mar	30.60	3.21	21.24	27.27	2.92	21.91
02-mar	59.11	3.78	20.98	32.92	2.24	21.94
03-mar	64.14	2.54	21.50	56.21	1.49	22.85
04-mar	87.65	1.80	22.04	91.88	0.84	23.57
05-mar	143.69	2.15	23.05	126.92	2.62	24.43
06-mar	176.15	3.23	23.40	136.04	2.25	24.57
07-mar	232.73	3.28	23.32	175.88	2.70	25.00
08-mar	36.30	2.50	21.20	104.90	2.00	23.40
09-mar	57.70	3.00	20.80	35.80	3.00	22.70
10-mar	67.40	2.04	21.03	67.40	1.60	22.40
	Dirección del viento		Velocidad del viento		Temperatura	
MBE	10.03		0.59		- 1.42	
RMSE	33.28		0.80		1.48	

cuidado a la hora de establecer medidas o protocolos relacionados con las concentraciones máximas admisibles y la calidad del aire.

Para poder emplear las salidas numéricas del modelo WRF como sustitución de los datos meteorológicos medidos en estaciones, se hace necesario también saber cómo las salidas del AERMOD, ya sea a partir de datos medidos o estimados, se comportan con respecto a los valores de referencia establecidos en la norma cubana NC 1020 de 2014: Calidad de aire - Contaminantes - Concentraciones Máximas Admisibles y Valores Guías en Zonas Habitables. Por tanto, si las concentraciones obtenidas a partir de datos medidos en la estación exceden la norma máxima admisible, entonces las concentraciones que se obtienen a partir de datos modelados por el WRF, deberían excederla también. Lo mismo, para el caso donde no la sobrepase.

En la **Tabla 5** se muestran los valores promedios de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de CO, NO_x y SO₂ del período analizado, para los casos donde los datos meteorológicos son obtenidos de la estación meteorológica (valores medidos) y modelados por el WRF para la Fuente # 1; así como los valores de referencia establecidos en la norma NC 1020. Es importante aclarar que se decide hacer esta comparación solamente con la Fuente # 1 debido a la cercanía con la estación (7 Km); por tanto, si los valores son similares para esta fuente, entonces para cualquier otra fuente también lo serán.

Como puede observarse para los 3 contaminantes, ambas concentraciones tienen un comportamiento similar con respecto a los valores de referencia: en el caso del CO las dos son inferiores; mientras que para el NO_x y el SO₂ ambas concentraciones sobrepasan el valor de la norma; lo cual no significa que se viole la norma de Calidad de Aire, para asegurarlo es necesario hacer un estudio más a fondo que incluya una muestra de mayor tamaño.

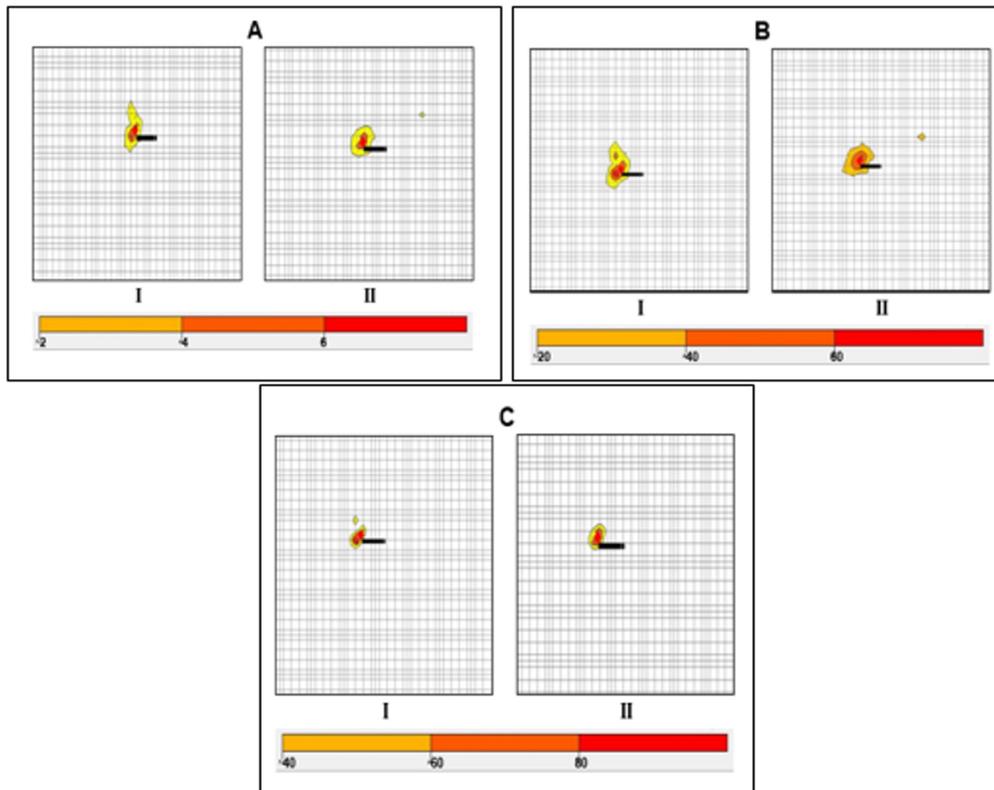


Figura 5. Concentraciones de CO (A), NO_x (B) y SO₂ (C) a partir de variables meteorológicas medidas en la estación (I) y estimadas en la Fuente # 1 (II)

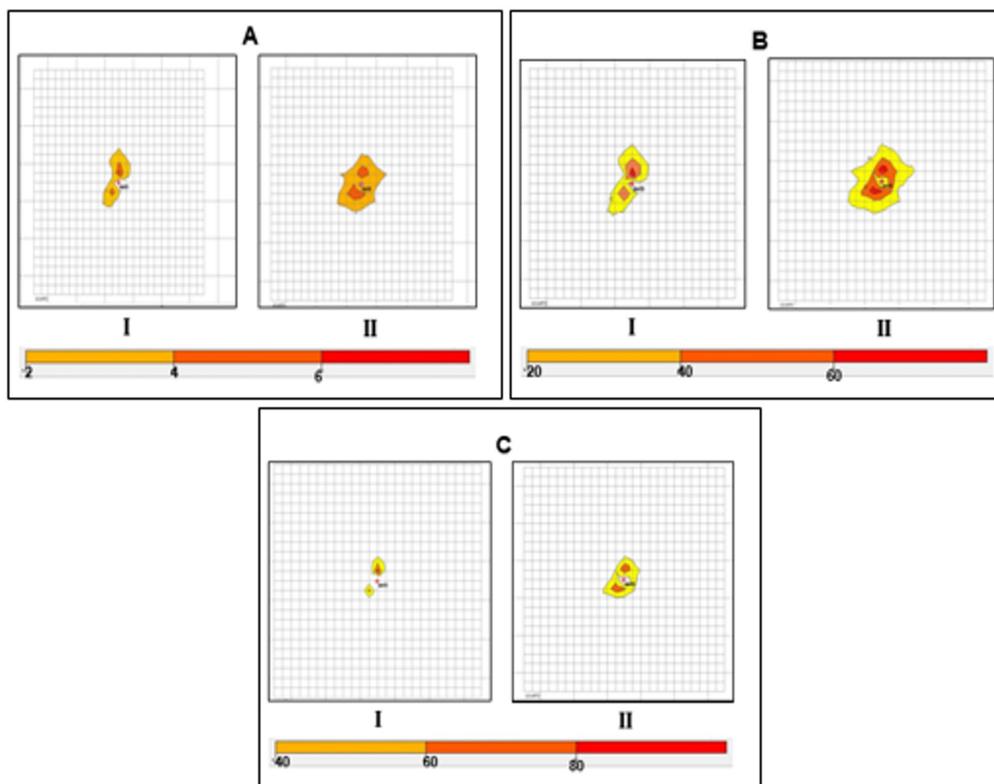


Figura 6. Concentraciones de CO (A), NO_x (B) y SO₂ (C) a partir de variables meteorológicas medidas en la estación (I) y estimadas en la Fuente # 2 (II)

Tabla 5. Comparación de los valores promedios de concentración de los contaminantes y valores de referencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Contaminantes	Concentración obtenida a partir de valores medidos	Concentración obtenida a partir de valores modelados	Valores de referencia
CO	6.11	6.8	8000
NO _x	79.18	86.09	45
SO ₂	82.44	89.53	40

CONCLUSIONES

1. Los datos meteorológicos medidos en estaciones pueden presentar problemas como: no ser representativos del lugar, existencia de datos faltantes o costo elevado; por lo cual es necesario evaluar el empleo de datos empíricos provenientes de modelos numéricos (WRF) para estudios de impacto ambiental.
2. La ejecución del modelo de dispersión AERMOD a partir de las salidas numéricas del modelo WRF no es un proceso directo ya que requiere del empleo del programa MMIF, el cual sirve de acople entre ambos modelos.
3. Es posible usar el modelo WRF como herramienta alternativa para la obtención de datos meteorológicos necesarios para realizar evaluaciones de impacto ambiental con el modelo de dispersión AERMOD.

BIBLIOGRAFÍA

- Coronado, J. D. (2019). *Análisis de sensibilidad para el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos AERMOD en el Estudio de Impacto Ambiental PCH El Buey*. Medellín, Colombia: Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia.
- EPA . (s.f.). Recuperado el 2021, de <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-related-model-support-programs#mmif>
- EPA. (2018). *Guidance on the Use on the Mesoscale Model Interface Program (MMIF) for AERMOD. Applications*. Estados Unidos.
- EPA. (2019). *User's Manual. The Mesoscale Model Interface Program (MMIF)*. Estados Unidos.
- Grisales Vargas , S. C., Cubaque López , H., & Agudelo Cadavid , R. M. (2016). *Contaminantes en el Valle de Aburrá 2008 - 2016*. Colombia: Facultad Nacional de Salud Pública, Universidad de Antioquia.
- Muiña, F. G. (2020). Evaluación del WRF como herramienta alternativa para determinar el rendimiento de un sistema fotovoltaico en condiciones de cielo despejado. La Habana, Cuba: Presentado como requisito para optar por el Título de Licenciatura de Meteorología, Facultad de Medio Ambiente, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- National Center for Atmospheric Research. (2015). *Manual ARW Version 3 Modeling System User's Guide*. s.I.: Mesoscale & Microscale Meteorology Division.
- Sierra, D. (2014). Evaluación del modelo fotoquímico CCATT - BRAMS para su implementación en Cuba. La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Turtos, L., Capote, G., & Fonseca, Y. (2013). Assessment of the WRF model implementation in Cuba addressed to diagnostic air quality modeling. *Atmospheric Pollution Research* (4), 64 - 74.
- Verde, A. V. (2014). *Evaluación del pronóstico del viento del modelo Weather Research Forecast (WRF) en torres de prospección eólica*. La Habana, Cuba: Presentado como requisito para optar por el Título de Licenciatura en Meteorología, Facultad de Medio Ambiente, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Vidal, O., & Pérez, A. (2017). Estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una Industria Papelera mediante el modelo AERMOD. *Ingeniería, Colombia*, 23(1).