

Evaluación del modelo meteorológico WRF para la validación del modelo AERMOD

**O. O. Mendoza-Lara¹, V. Arévalo-Mendoza¹, C. G. Villareal-Esquivel¹, A. Pérez-Castillo¹
y ²A. Morales-González**

¹Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra, Comisión Federal de Electricidad, Av. Santa Cecilia 211-B, C.P. 54120, Tlalnepantla, Edo. de México.

²Gerencia de Protección Ambiental, CFE, Anillo Periférico 4156, C.P. 01900, Ciudad de México.

*e-mail: osiel.mendoza@cfe.mx

Resumen

En el presente trabajo se evalúa la sensibilidad de la base de datos meteorológicos generadas por el sistema de modelización meteorológico WRF, extrayendo los valores representativos para un sitio empleando el modelo MMIF. La estación meteorológica seleccionada de referencia (Villa de las Flores) es administrada por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, y está ubicada en el municipio de Coacalco.

Para determinar la sensibilidad se analizó cualitativamente el comportamiento de los datos en una serie de tiempo a diferentes escalas, mientras que el análisis cuantitativo se efectuó utilizando los siguientes estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio normalizado (NMAE) (NMB), el sesgo (BIAS), coeficiente de correlación de Pearson (r) y el índice de ajuste (IOA).

Se evaluó la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y dirección del viento, dando como resultado que las tres primeras variables tienen un índice bueno de concordancia. No obstante, hubo diferencias cualitativas, pero no significativas en la dirección de viento, se infiere que puede ser producto de la escala utilizada en la modelización en el WRF.

Palabras Clave: AERMET, sensibilidad, meteorología, estadística, contaminación.

Abstract

This work evaluates the sensitivity of the weather database generated by the WRF weather modeling system, extracting the representative values for a site using the MMIF model.

The selected reference weather station (Villa de las Flores) is managed by the Atmospheric Monitoring System of Mexico City, and is in the municipality of Coacalco. For the determination of sensitivity, the behavior of the data was qualitatively analyzed at different scales, while quantitative analysis was performed using the following statistics: mean quadratic error (RMSE), normalized mean absolute error (NMAE), bias (BIAS), Pearson correlation coefficient (r), and adjustment index (IOA).

Temperature, relative humidity, wind speed and direction were evaluated, resulting in the first three variables having a good concordance index. However, there were qualitative differences, but not significant in wind direction, it is inferred that it may be a product of the scale used in modeling in the WRF.

Keywords: AERMET, sensitivity, meteorology, statistics, pollution.

I. Introducción

El crecimiento de las zonas urbanas y el desarrollo de las actividades humanas han propiciado un mayor incremento económico y mejoras en aspectos sociales (González-Rocha, et al.). Sin embargo, la urbanización ha traído múltiples problemas; entre ellos, la contaminación del aire, cuyas consecuencias están empezando a ser reconocidas (Baldasano et al., 2003). En este sentido, una herramienta que resulta imprescindible para los estudios de contaminación atmosférica es el modelado matemático, al igual que en otras disciplinas, tiene como objetivo el analizar y estudiar los procesos implicados y su comportamiento (CIEMAT, 2015).

Los Modelos de la Calidad del Aire (MCA) se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios, por ejemplo, la escala espacial o el planteamiento de la ecuación con la que trabaja el sistema de modelización atmosférica. La información de entrada para los MCA incluye variables tales como, tasas de

emisión de contaminantes, condiciones de frontera (concentración de fondo), y variables meteorológicas, en particular la velocidad y dirección del viento, turbulencia, temperatura, presión, capa límite planetaria, humedad relativa, nubosidad y radiación solar (Seigneur & Dennis, 2011).

Como ya se mencionó, la meteorología es una parte fundamental en los estudios de dispersión de emisiones a la atmósfera, debido a que las variables meteorológicas utilizadas en los MCA tienen efecto sobre la concentración de contaminantes en los sitios receptores de interés (EPA, 2016). Los datos meteorológicos de superficie y en la vertical pueden ser tomados de estaciones cercanas al sitio, sin embargo, en mucho de los escenarios estas estaciones se encuentran a distancias significativas de donde se pretende modelar, por esta razón, los datos no son representativos en la zona de estudio.

Hasta el momento, no se ha desarrollado ningún protocolo de evaluación para estos modelos, siendo una tarea pendiente y necesaria. La mayoría de los estudios científicos se decantan por una evaluación de los resultados cualitativos (Jorba Casellas, 2005).

II. Marco teórico

Modelo meteorológico

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un sistema numérico de predicción meteorológica de mesoescala de última generación diseñado tanto para investigación atmosférica como para aplicaciones de pronóstico operativo. Este modelo es útil para obtener los parámetros meteorológicos requeridos para los modelos de calidad del aire (Kesarkar et al., 2007).

El sistema WRF es un esfuerzo de múltiples agencias de investigación, principalmente entre el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y el Laboratorio de Sistemas de Pronóstico (FSL), la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA), (Afzali et al., 2017).

AERMET-AERMOD

La Sociedad Meteorológica Americana (AMS) y La Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos de América (EPA) desarrolló el modelo de calidad del aire a escala local AERMOD en 1991 (Kumar et al., 2016). AERMOD es un modelo de dispersión Gaussiano el cual incorpora algoritmos del efecto de lavado de los edificios, depósito, efectos locales de terrenos y un avanzado cálculo de turbulencia (Kalhor & Bajoghli, 2017).

Es importante señalar que AERMOD puede implementar información meteorológica en la vertical real y estimada (EPA, 2004). Uno de los objetivos del modelo era implementar los conceptos actuales de capa límite planetaria (PBL) en un modelo de dispersión regulatorio.

El modelo utiliza datos generados por el uso de dos preprocesadores, AERMET y AERMAP. El primero se ocupa de los parámetros meteorológicos, mientras que el segundo se ocupa de los datos del terreno utilizando un modelo digital de elevación (DEM).

Los datos meteorológicos por hora se alimentan en AERMET para proporcionar parámetros meteorológicos de capa límite en el formato correcto para AERMOD. Estos datos de entrada para el preprocesamiento en AERMET pueden observarse o simularse utilizando un modelo meteorológico; esta elección puede hacerse según el objetivo del estudio y la disponibilidad de datos.

Acoplamiento WRF-AERMET

Para acoplar los resultados de las modelaciones de WRF a AERMET-AERMOD, se utiliza el software Mesoscale Model Interface (MMIF) desarrollado por la EPA. El MMIF puede generar resultados en múltiples puntos de la cuadrícula, sin embargo, AERMET-AERMOD utiliza datos de una sola celda de la cuadrícula que debería ser representativa de todo el dominio (EPA, 2015).

III. Método

Las etapas del método se resumen de la siguiente manera: 1) selección del sitio para analizar la meteorología observada, 2) identificar y descargar la base de datos por lo menos de una estación que mida como mínimo temperatura,

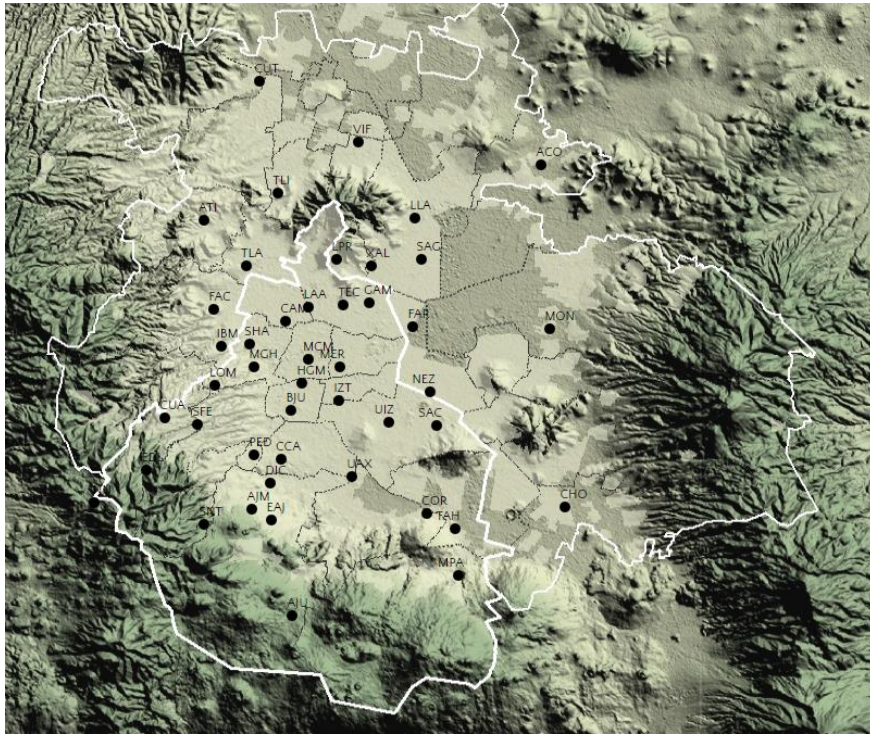
humedad relativa, velocidad y dirección del viento, 3) modelar la meteorología del dominio seleccionado con WRF, y generar mediante el modelo MMIF los datos meteorológicos del sitio, 4) analizar cualitativamente y cuantitativamente el comportamiento de los datos observados y modelados, para determinar la correlación y la concordancia entre ellos.

Selección del sitio

Como primer paso, se identificó una ciudad que contara con una red de monitoreo meteorológico. Para el presente estudio, se optó por seleccionar la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), debido a que el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México (CDMX) cuenta con 28 estaciones distribuidas en las alcaldías de esta ciudad, y en la Zona Conurbada del estado de México (Figura 1).



Figura 1.- Estaciones de monitoreo meteorológicas de SIMAT



Fuente: Elaboración propia.

Para la elección de la estación meteorológica de la red, se asignó un número a cada estación y por medio de MatLab®, se procesó el comando números aleatorios distribuidos uniformemente, dando como resultado la estación Villa de las Flores, ubicada en el municipio de Coacalco, estado de México. Las coordenadas de referencia de la estación son 489,874 m al Este y 2,173,663 m al Norte, en la zona 14 Q.

Meteorología observada

Para descargar la base de datos de la estación Villa de las Flores, se procedió a utilizar información alojada en el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (SIMAT, 2021). En este reservorio se encuentran los datos medidos de la red desde 1986 de las estaciones meteorológicas, y pueden descargarse en diferentes formatos (CSV, XML y JSON).

Los archivos contienen algunas variables meteorológicas medidas en sitio; la dirección [°] y velocidad del viento [m/s], humedad relativa [RH] y temperatura [°C]. De acuerdo con el SIMAT, los valores reportados están validados, sin embargo, se aplicó el criterio de suficiencia del 75%, que de acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012), se debe de cumplir este mínimo porcentaje para ser considerado como una base de datos validada. Por último, se escogió el año más completo y reciente, descartando el año 2020 debido a que se considera un año atípico.

Meteorología modelada

Las variables contempladas en la modelación de la meteorología en superficie fueron las siguientes: flujo de calor sensible [W/m²], velocidad de fricción de la superficie [m/s], rugosidad de la superficie [m], velocidad conectiva [m/s], altura de capa límite planetaria conectiva y mecánica [m], longitud de Monin-Obukhov [m], radio de Bowen, Albedo, temperatura superficial [K], velocidad [m/s] y dirección de viento [°], precipitación [mm], humedad relativa [%], presión superficial [mb] y cobertura de nubes.

Mientras que en la vertical (175, 206.2, 250, 300, 350, 400, 512.5, 600, 700, 800, 900, 1100, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000 metros), fueron las siguientes: velocidad [m/s] y dirección de viento [°], temperatura superficial [K] y desviaciones estándar de velocidad y dirección del viento. En este sentido, los parámetros utilizados en la modelación meteorológica se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Parámetros utilizados en la modelación meteorológica.

Tema	Parámetro
Sistema de modelación meteorológico	WRF
Resolución	12 km
Zona de estudio	50 km x 50 km
Período	31 de diciembre de 2018 al 1 de enero de 2020 (2019)

datos. Para esta última, es necesario conocer el comportamiento de los variables, así como la aplicación de estadísticos para su validación.

Para analizar cualitativamente los datos meteorológicos, es conveniente utilizar gráficas de series de tiempo comparándolas con los datos observados, esto con el fin de identificar el comportamiento a través del tiempo. En el presente estudio se propone analizar datos horarios por días de la semana, comportamiento de los datos por hora y comportamiento mensual. Para la dirección del viento, se plantea usar rosas de viento por estación, esto con el fin determinar las direcciones predominantes de cada base de datos.

Por otra parte, para el análisis cuantitativo, se ha optado por utilizar el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio normalizado (NMAE), el sesgo (BIAS), coeficiente de correlación de Pearson (r) y el índice de ajuste (IOA).

El RMSE nos da la medida del promedio de las diferencias entre los valores pronosticados y los observados, aportando información sobre la precisión del modelo, y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}}$$

donde

ϕ_i = es el valor pronosticado

ϕ_{iobs} = es el valor observado

N = es el número de valores analizados

El NMB se utiliza para tener en cuenta el peso del error sistemático encontrado frente al valor de la variable de medida, la ecuación es la siguiente:

$$NMB = \sum \frac{abs(\phi_i - \phi_{iobs})}{\phi_{iobs} N}$$

El BIAS nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo, conforme a las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, 2006) establece un sesgo

recomendado medio de entre ± 5 y $\pm 15\%$. El BIAS se define de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$BIAS = \sum \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{N}$$

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide la relación lineal existente entre dos variables, dando una idea del grado de relación existente entre ambas, de forma que $r=1$ implica que existe una relación directa perfecta, y $r=0$ que no se puede comprobar que exista relación lineal entre las variables. El coeficiente r se calcula de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N Z_{\phi_i} Z_{\phi_{iobs}}}{N}$$

Finalmente, el IOA complementa la información aportada por el resto de los estadísticos, al informar con un índice general sobre el comportamiento del modelo al compararlo con datos reales. Los resultados de la concordancia generalmente se clasifican según la siguiente escala (Carrisoza Urbina et al., 2015; Gilchrist, 2009): a) -1 a 0.00, concordancia totalmente inadecuada, b) 0.01 a 0.39, concordancia insuficiente, c) 0.40 a 0.75, buena concordancia, d) 0.76 a 0.99, excelente concordancia, e) 1, concordancia perfecta. El índice de ajuste se calcula como:

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (abs(P_i - O_m) + abs(P_i - O_m))^2}$$

P_i = valores pronosticados

ϕ_i = valores observados

ϕ_m = media de observaciones

Es importante señalar que, el análisis estadístico fue realizado conforme a las variables medidas en VIF (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento).

IV. Resultados

Temperatura

De acuerdo con la Figura 3, indica de manera cualitativa que el comportamiento de lo observado a lo modelado es similar, no obstante, en los promedios

mensuales en julio, agosto y septiembre resultan ser menores a lo modelado. Según la evaluación de la sensibilidad, y tomando en cuenta la clasificación del IOA, coincide que para los en julio, agosto y septiembre existe una concordancia insuficiente, en tanto para los meses restantes la concordancia es excelente. La temperatura modelada para el año 2019 se considera con buena concordancia.

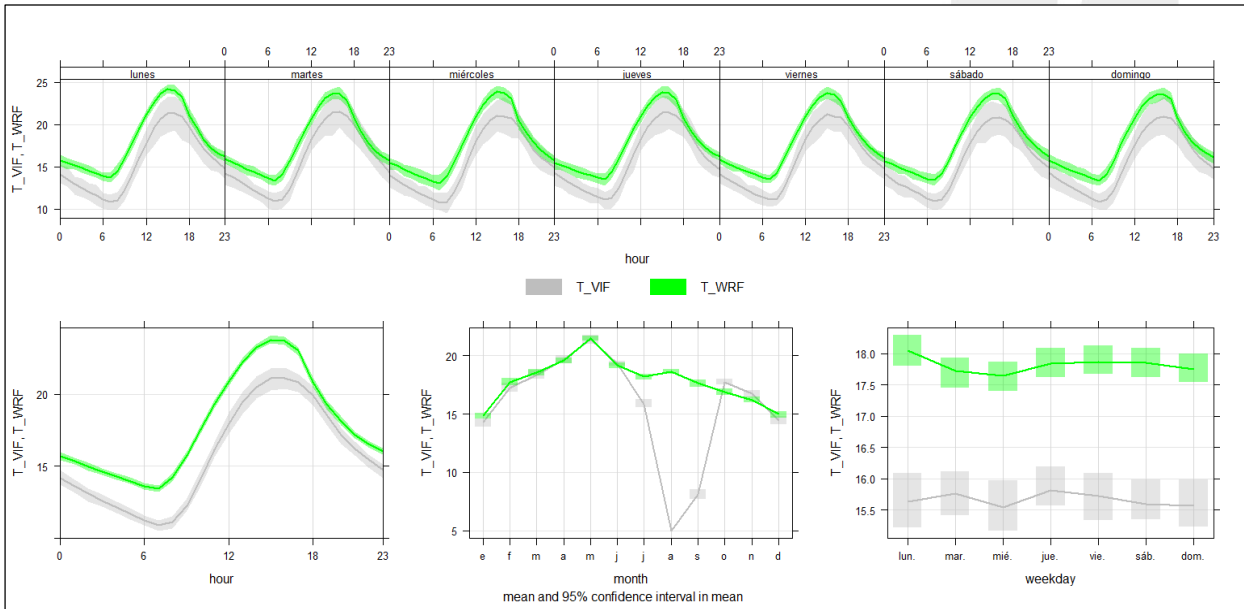
Tabla 2.- Evaluación de la sensibilidad para la temperatura

Mes	n	Temperatura				
		MB	NMB	RMSE	r	IOA
Ene	744	0,5	0,0	2,2	0,9	0,8
Feb	672	0,5	0,0	2,0	1,0	0,8
Mar	744	0,2	0,0	2,1	1,0	0,8
Abril	720	-0,1	0,0	2,1	0,9	0,8
May	744	0,1	0,0	2,3	0,9	0,8
Jun	720	-0,2	0,0	1,7	0,9	0,8
Jul	744	2,3	0,1	5,5	0,5	0,6
Agos	744	13,6	2,7	14,2	NA	-1,0
Sep	720	9,6	1,2	11,4	0,2	0,0
Oct	744	-0,9	0,0	1,8	0,9	0,8
Nov	720	-0,5	0,0	1,7	0,9	0,8
Dic	744	0,5	0,0	2,1	0,9	0,8
Total anual						0,68

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.- Comportamiento de la temperatura [°C] observada (T_VIF) y modelada (T_WRF) para el año 2019. Series de tiempo horaria por semana, diaria, mensual y semanal.



Fuente: Elaboración propia

Humedad relativa

De acuerdo con la Figura 4 sugiere de manera cualitativa que el comportamiento de lo observado a lo modelado es similar. De acuerdo con la aplicación de los estadísticos y tomando en cuenta la clasificación del IOA(), para el mes de febrero existe una excelente concordancia, mientras que para el resto del año la concordancia es buena. La humedad relativa simulada para el año 2019 se evalúa con buena concordancia.

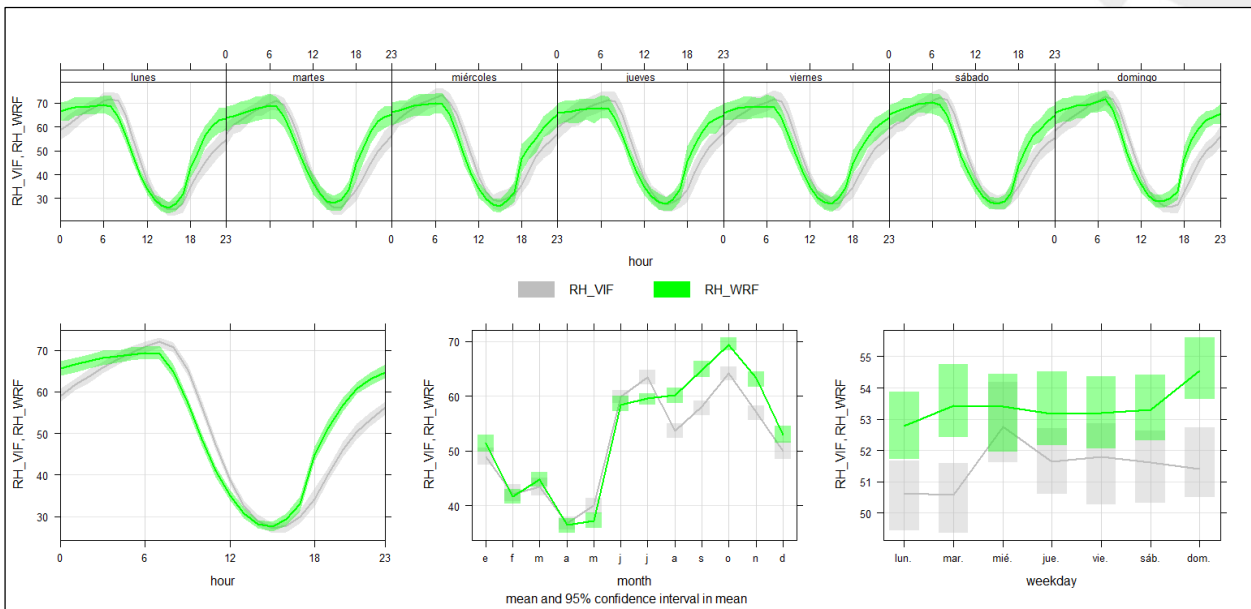
Tabla 3.- Evaluación de la sensibilidad para la humedad relativa

Mes	n	Humedad relativa				
		MB	NMB	RMSE	r	IOA
Ene	744	2,5	0,1	15,2	0,8	0,7
Feb	672	-0,4	0,0	10,9	0,8	0,8
Mar	744	1,4	0,0	13,4	0,8	0,7
Abril	720	-0,2	0,0	12,1	0,8	0,7
May	744	-2,8	-0,1	14,5	0,7	0,7
Jun	720	-1,4	0,0	13,1	0,8	0,7
Jul	744	-3,8	-0,1	11,8	0,8	0,7
Agos	744	6,6	0,1	13,3	0,8	0,7
Sep	720	6,8	0,1	15,5	0,7	0,6

Mes	n	Humedad relativa				
		MB	NMB	RMSE	r	IOA
Oct	744	5,2	0,1	12,9	0,8	0,7
Nov	720	6,2	0,1	13,6	0,8	0,7
Dic	744	2,9	0,1	12,7	0,8	0,7
Total anual						0,73

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.- Comportamiento de la humedad relativa [%] observada (RH_VIF) y modelada (RH_WRF) para el año 2019. Series de tiempo horaria por semana, diaria, mensual y semanal.



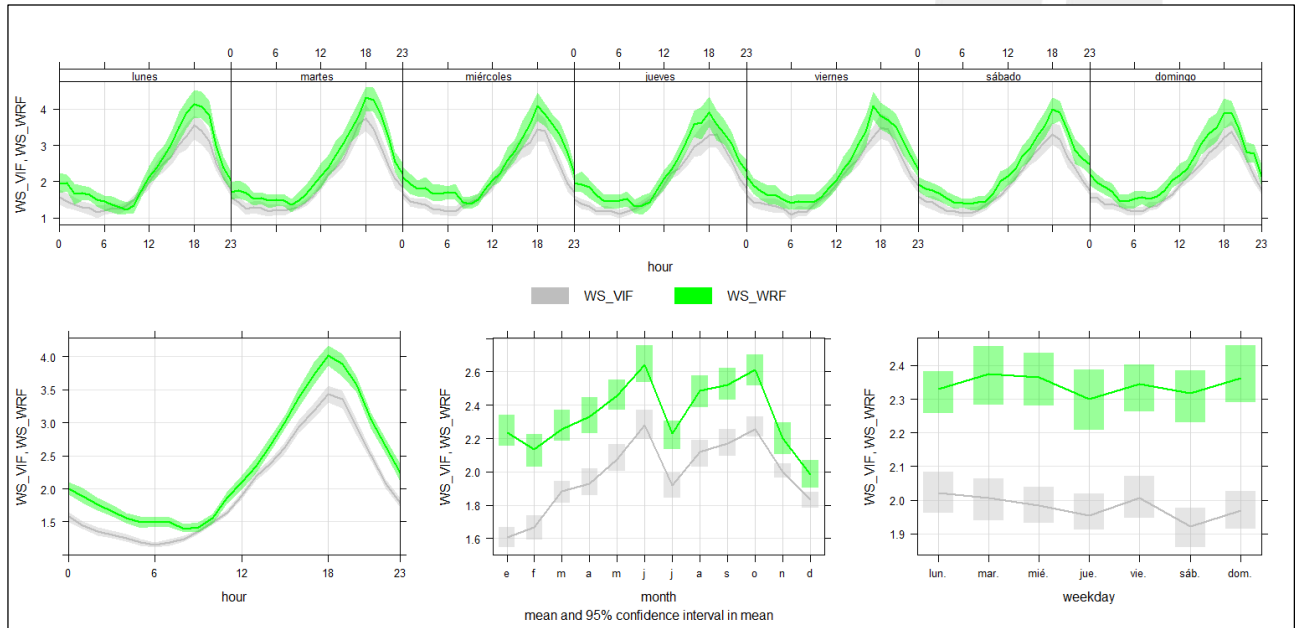
Fuente: Elaboración propia.

Velocidad y dirección del viento

En esta sección, conviene señalar que la velocidad y dirección son dos variables distintas, no obstante, en los MCA es importante considerar el producto de estas. La velocidad de viento puede ser analizada con los estadísticos propuesto, pero no la dirección, esto derivado a la naturaleza de la variable, dado que son datos polares.

De acuerdo con la Figura 5, indica de manera cualitativa que el comportamiento de lo observado a lo modelado es similar en todas las series de tiempo. Basándose en la evaluación de la sensibilidad, y tomando en cuenta la clasificación del IOA (Tabla 4), para el mes de enero y noviembre la concordancia es totalmente inadecuada, en comparación de del resto de los meses la concordancia es buena.

Figura 5.- Comportamiento de la velocidad del viento [°C] observada (WS_VIF) y modelada(WS_WRF) para el año 2019. Series de tiempo horaria por semana, diaria, mensual y semanal.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.- Evaluación de la sensibilidad para la velocidad del viento

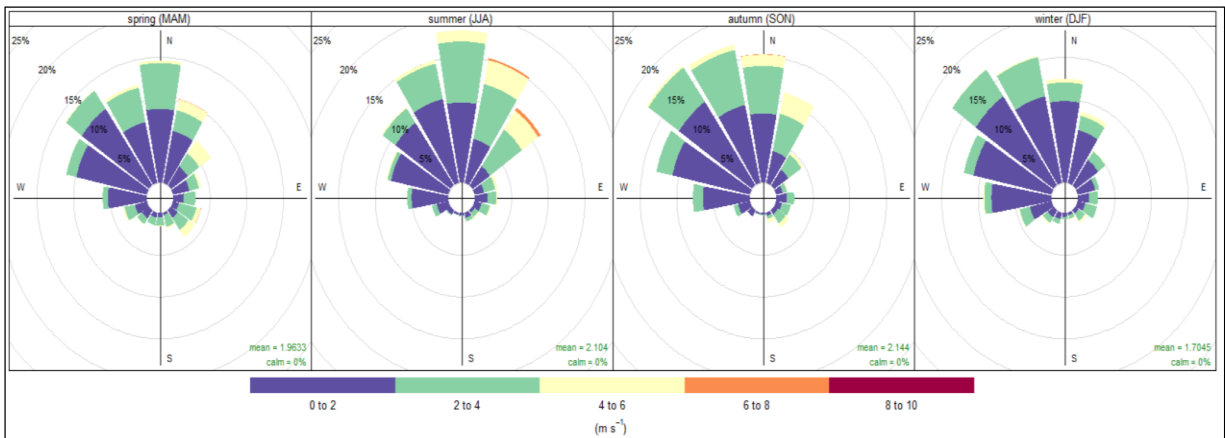
Mes	n	Velocidad del viento				
		MB	NMB	RMSE	r	IOA
Ene	744	0,6	0,4	1,2	0,6	0,3
Feb	672	0,5	0,3	1,2	0,6	0,4
Mar	744	0,4	0,2	1,2	0,6	0,4
Abril	720	0,4	0,2	1,4	0,5	0,4
May	744	0,4	0,2	1,4	0,5	0,4
Jun	720	0,4	0,2	1,1	0,7	0,6
Jul	744	0,3	0,2	1,1	0,6	0,5
Agos	744	0,4	0,2	1,1	0,7	0,6
Sep	720	0,4	0,2	1,1	0,7	0,5
Oct	744	0,4	0,2	1,1	0,6	0,5
Nov	720	0,2	0,1	1,1	0,5	0,2
Dic	744	0,1	0,1	1,2	0,5	0,0
Total						0,44

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el IOA tiene un valor de 0,44, la dirección de viento generada por el modelo WRF para el año 2019 tiene una sensibilidad con buena concordancia. Finalmente, la comparación de las direcciones de viento entre lo observado y modelado (Figura 6 y Fuente: Elaboración propia.

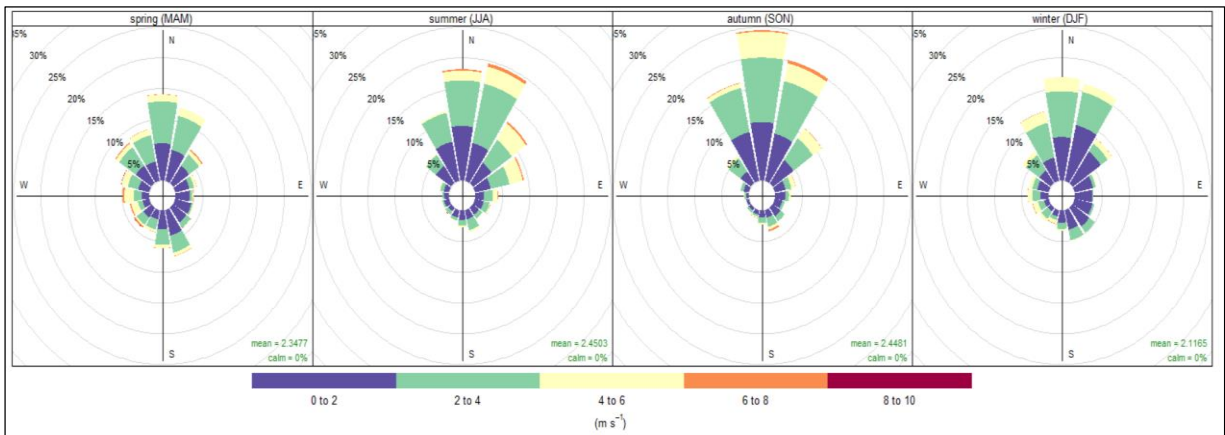
Figura 7), aparentemente resulta ser semejantes, aunque se visualiza una mayor tendencia de vientos predominantes de noroeste, en comparación de los valores del modelo que presenta mayor presencia de vientos provenientes del norte.

Figura 6.- Dirección del viento por estaciones correspondiente al año 2019 en la estación Villa de las Flores.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.- Dirección del viento por estaciones correspondiente al año 2019 generada por el modelo meteorológico WRF



Fuente: Elaboración propia.

V. Discusión

La base de datos de meteorología calculado a partir del sistema de modelización matemática WRF se determina con un índice de buena concordancia con respecto a los valores medidos en la estación meteorológica de Villa de las Flores,

específicamente en la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. De acuerdo con los resultados obtenidos para la temperatura, en los meses de julio, agosto y septiembre la concordancia fue insuficiente, probablemente a un error en la medición en estos meses, lo anterior se infiere debido a que se puede observar en las gráficas de comportamiento que estos meses (verano) tienen un promedio menor con respecto a los meses más fríos del año (enero y diciembre). Mientras que, para la humedad relativa, en general para todo año el índice de concordancia se considera como buena.

En el tema velocidad del viento, para los meses de noviembre, diciembre y enero fue totalmente inadecuada, se tendría que visitar la zona donde se encuentra la estación de monitoreo para identificar si existen barreras físicas que influyan en la medición de esta variable. Por otra parte, con relación a dirección de viento hubo diferencias cualitativas, pero se estima que esta discrepancia es en vista de que las coordenadas de generación de datos del WRF, no se ubican espacialmente en el mismo punto de la estación meteorológica de Villa de las Flores, dado a que la distancia entre las coordenadas es de 5 km. Así mismo, es probable que la resolución de la malla de cálculo de 12 km del WRF no sea adecuado para evaluar la concordancia entre los datos modelados y datos medidos, por lo que se recomienda en trabajos posteriores analizar mallas con resolución mayores a este (<12 km).

En México, así como en gran parte de los países del mundo, se carece de información meteorológica confiable de superficie y vertical en regiones donde es complicado instalar u operar estaciones. Por consiguiente, en materia de contaminación atmosférica para los MCA, resulta imprescindible generar base de datos, protocolos, guías, normas e índices que nos ayuden a mejorar la precisión de los modelos, lo que contribuiría a una mejor gestión de la calidad del aire.

VI. Referencias

- Afzali, A., Rashid, M., Afzali, M., & Younesi, V. (2017). Prediction of Air Pollutants Concentrations from Multiple Sources Using AERMOD Coupled with WRF Prognostic Model Afsaneh. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.196>
- Baldasano, J. M., Valera, E., & Jiménez, P. (2003). Air quality data from large cities. *The Science of the Total Environment*, 307(1-3), 141-165. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00537-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00537-5)
- Carrisoza Urbina, J., Flores Velázquez, E., Gutiérrez Reyes, J. A., & Juárez López, N. O. (2015). Wettbewerb Berufliche Schulen Dokumentation des Wettbewerbs ... mit den Preisträgerinnen und Preisträgern. In *Veterinaria México OA* (Vol. 2, Issue 3). Landesstiftung. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-67602015000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- CIEMAT. (2015). *Modelización de la contaminación atmosférica*. Retrieved from *Introducción a modelos*: <http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do?IDM=10&NM=2>.
- EPA. (2004). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model e AERMOD*. EPA 454/B 03 001.
- EPA. (2006). *40 CFR Subchapter C - AIR PROGRAMS*.
- EPA. (2015). *Guidance on the Use of the Mesoscale Model Interface Program (MMIF) for AERMOD Applications*. EPA-454/B-15-001.
- EPA. (2016). *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM)*. Air Modeling - Observational Meteorological Data. <https://www.epa.gov/scram/air-modeling-observational-meteorological-data>
- Gilchrist, J. M. (2009). Weighted 2 × 2 kappa coefficients: recommended indices of diagnostic accuracy for evidence-based practice. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1045-1053. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2008.11.012>
- González-rocha, Sergio Natan, Oseguera, J., Zúñiga, M., Palomino, I., Ríos, L., Vega. (2015). Contaminación ambiental por ruido urbano en la ciudad de poza rica, Veracruz, México. *Exploratoris, Revista de La Realidad Global*, 4(ISSN 2153-3318).
- Jorba Casellas, O. (2005). Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/6836>
- Kalhor, M., & Bajoghli, M. (2017). Comparison of AERMOD , ADMS and ISC3 for incomplete upper air meteorological data (case study: Steel plant). *Atmospheric Pollution Research*. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.001>
- Kesarkar, A. P., Dalvi, M., Kagainalkar, A., & Ojha, A. (2007). *Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling . A case study*

for *PM10 dispersion over Pune , India.* 41, 1976–1988.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.042>

Kumar, A., Patil, R. S., Kumar, A., Kumar, R., Brandt, J., & Hertel, O. (2016). Assessment of impact of unaccounted emission on ambient concentration using DEHM and AERMOD in combination with WRF. *Atmospheric Environment*, 142, 406–413.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.024>

NCEP. (2020). *National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2000): NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research.*

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tipp, P., & Behringer, D. (2011). *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.*

Seigneur, C., & Dennis, R. (2011). *CHAPTER 8: Atmospheric modeling.*

SEMARNAT. (2012). NOM-156-SEMARNAT-2012. *INECC*, 32.

