

Verificación del pronóstico numérico del modelo WRF para La Habana, Artemisa y Mayabeque. Estudio de casos



<https://cu-id.com/2377/v28n3e03>

Verification of the numerical forecast of the WRF model for La Habana, Artemisa and Mayabeque. Study of cases

Christian Lam Cervantes^{1*}, Carlos M. González Ramírez², Pedro M. González Jardines³

¹Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología (INSMET), Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

²Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología (INSMET), Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

³Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología (INSMET), Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Se realizó una verificación del pronóstico numérico del tiempo que se obtuvo con el modelo *Weather Research and Forecast*, para las provincias La Habana, Artemisa y Mayabeque. El análisis se realizó considerando tres casos de estudio que comprenden diferentes tipos de fenómenos de escala sinóptica o de mesoescala que afectaron a la región de estudio. Se utilizaron dos dominios anidados de 12 y 4 km de resolución espacial, seleccionando para la verificación el de 4 km, y se emplearon tres combinaciones distintas de parametrizaciones de cúmulo y microfísica. Fueron tomados como patrón de comparación los datos de observaciones de las diez estaciones meteorológicas de la región, correspondientes a las variables presión atmosférica ajustada al nivel medio del mar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa. Se utilizó la metodología de verificación celda-punto, calculando estadígrafos para caracterizar la habilidad de pronóstico con dicho modelo. Se concluye que el mejor desempeño del modelo se observa en el pronóstico de la variable presión atmosférica, mientras que la velocidad del viento es la variable peor simulada. Las estaciones localizadas en la costa sur poseen, en la mayoría de los casos, los mayores errores de pronóstico.

Palabras Clave: verificación, pronóstico numérico, WRF.

ABSTRACT: A verification of the numerical weather forecast obtained with the WRF model was carried out for the provinces of La Habana, Artemisa and Mayabeque. The analysis was performed for three case studies that comprise different types of synoptic scale or mesoscale phenomena that affected the study region. For the simulations, two nested domains of 12 and 4 km of spatial resolution were used, selecting for verification the 4 km, and three different combinations of convection and microphysics parameterizations were used. The data of observations from the ten meteorological stations in the region were taken as a comparison standard, corresponding to the variables to mean sea level pressure, air temperature, wind speed and relative humidity. The cell-point verification methodology was used, calculating statistics to characterize the forecasting ability with said model. The meteorological stations were grouped into three regions for the differentiated study of forecast errors. It is concluded that the best performance of the model is observed in the forecast of the atmospheric pressure variable, while the wind speed is the worst simulated variable. The stations located on the southern coast have, in most cases, the largest forecast errors.

Key words: verification, numerical forecast, WRF.

INTRODUCCIÓN

El impacto de los fenómenos atmosféricos en la vida diaria del hombre ha hecho del pronóstico del tiempo una necesidad. Estos pronósticos pueden ser de distinto tipo, entre ellos están los sinópticos, los estadísticos y los dinámicos o numéricos. Estos últimos se implementan en modelos numéricos, basados en ecuaciones físico-matemáticas que son capaces de simular y predecir procesos atmosféricos de diferentes escalas espaciales y temporales.

A pesar del continuo desarrollo de los modelos numéricos, gracias al progresivo desarrollo tecnológico y computacional, no son capaces de representar en su totalidad los fenómenos atmosféricos. Esto, unido al considerable impacto social -dado que es de gran importancia la exactitud de los pronósticos numéricos para los diferentes sectores de la sociedad, desde la economía nacional hasta la planificación personal-, deriva en la necesidad de mejorar y perfeccionar la calidad de los mismos. Una forma eficiente de lograr esto es mediante la evaluación o verificación de los modelos numéricos que proveen dichos pronósticos (Díaz & Díaz, 2010).

*Autor para correspondencia: Christian Lam Cervantes. E-mail: christian.lam@insmet.cu

Recibido: 13/09/2021

Aceptado: 14/07/2022

Entre los modelos numéricos empleados se encuentra el de mesoescala Weather Research and Forecast (WRF), ampliamente utilizado para el pronóstico a corto y mediano plazo. En el ámbito nacional se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre la verificación de los pronósticos numéricos ofrecidos por este modelo, como es el caso de Pérez et al. (2014), quienes presentaron el diseño y desarrollo del Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera (SPNOA) y realizaron una evaluación preliminar de las variables atmosféricas; estudio continuado por Sánchez et al. (2018) empleando un período de estudio más amplio para evaluar la componente atmosférica del SPNOA. Sierra et al. (2014) realizaron un grupo de experimentos para determinar la configuración más apropiada para el pronóstico a muy corto plazo del Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI), que posteriormente fueron realizados para el dominio de más alta resolución (Sierra et al., 2017). Por otra parte, se aplicó y verificó el modelo WRF para el pronóstico de precipitaciones en el período lluvioso del año 2014 en Cuba (Moya & Ortega, 2015).

Una verificación del pronóstico cuantitativo de la precipitación, ofrecido por el SisPI, se realizó para las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana (Moreno et al., 2017). Sin embargo, en esta región se experimenta con una nueva configuración del WRF, ajustada a las exigencias del grupo de pronóstico para las provincias de Artemisa y Mayabeque, el cual ha sido objeto de estudio de varios autores como González et al. (2017), Félix et al. (2017) y Fuentes et al. (2019). Por tal motivo, el presente trabajo tiene como objetivo general realizar una verificación de las variables meteorológicas pronosticadas por el modelo WRF operativo diseñado para las provincias La Habana, Artemisa y Mayabeque. Para el desarrollo de la investigación se trazan los siguientes objetivos específicos:

- Verificar puntualmente el desempeño del modelo WRF en el pronóstico numérico de las variables presión atmosférica, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa, para tres casos de estudio.
- Comparar los resultados de las verificaciones de los pronósticos de las variables estudiadas, de acuerdo a la agrupación de estaciones en tres zonas: costa norte, interior y costa sur.
- Determinar, para cada caso de estudio, la configuración más adecuada del modelo a partir de varias combinaciones de parametrizaciones de microfísica y cúmulo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área y casos de estudio

El territorio que abarca las provincias La Habana, Artemisa y Mayabeque, se caracteriza por un alto desarrollo económico, una alta densidad poblacional (solo La Habana cuenta con más de dos millones de habitantes) y un constante flujo de pasajeros. La región posee la mayor densidad de estaciones meteorológicas del país, con un total de diez. Estas razones, unido a la elevada ocurrencia de fenómenos meteorológicos y su impacto en la población, hacen que dicha región haya sido seleccionada para el desarrollo de la presente investigación.

La región de estudio fue dividida, para un mejor análisis, en tres zonas: costa norte, interior y costa sur (Figura 1). Esta división se realizó adaptando la regionalización del país establecida por Barcia et al. (2012), que toma en cuenta la influencia o no del régimen de brisas marinas, así como el comportamiento de las temperaturas extremas.

Fueron seleccionados para la investigación tres casos de estudio en los que se verificará el comportamiento del modelo (Tabla 1). El criterio de selección se basó en, a partir de las simulaciones del modelo disponibles, escoger casos que comprendieran diferentes tipos de fenómenos de escala sinóptica o de mesoescala que afectaron a la región de estudio, y determinar el comportamiento del modelo en cada una de las situaciones. Las variables meteorológicas analizadas fueron: presión atmosférica ajustada al nivel medio del mar, temperatura del aire a 2 metros, velocidad del viento a 10 metros y humedad relativa a 2 metros.

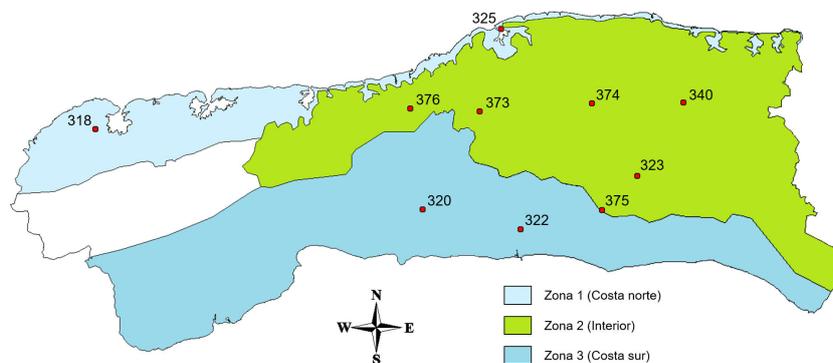


Figura 1. Distribución de las estaciones meteorológicas y regionalización del área de estudio.

Configuración del modelo WRF

Se empleó el modelo de pronóstico numérico WRF con el núcleo dinámico ARW (*Advanced Research WRF*) en su versión 3.9. Para las simulaciones fueron utilizados dos dominios anidados. El dominio externo (dominio 1) fue construido con una resolución horizontal de 12 kilómetros y temporal de tres horas, mientras que el dominio anidado (dominio 2) fue diseñado con una resolución horizontal de cuatro kilómetros y temporal de una hora (Figura 2). Para la verificación fue utilizado el dominio de mayor resolución (4 km) para realizar un estudio más detallado de los fenómenos mesoescalares presentes en los casos de estudio.

Para las condiciones iniciales y de frontera fueron empleados datos de pronóstico del modelo global GFS (*Global Forecast System*), con resolución espacial de 0.25° y temporal de tres horas, a partir del horario

de las 0000 UTC, con 36 horas de pronóstico, de las cuales solo serán empleadas 30 horas en la evaluación, descartando las seis primeras horas como parte del autoajuste del modelo.

Se probaron tres combinaciones de parametrizaciones de microfísica y cúmulo: esquema de microfísica *WRF Single-Moment-5-class* y esquema de cúmulos *Grell-Freitas* (WSM5-GF), esquema de microfísica *Morrison double-moment* (Morrison 2-M) y esquema de cúmulos no activado, y esquema de microfísica Lin *et al.* y esquema de cúmulos *Kain-Fritsch* (Lin-KF). La Tabla 2 muestra algunas características de la configuración del WRF empleada.

Verificación puntual

Una vez concluidas las corridas se analizó la efectividad de las simulaciones efectuadas por el WRF mediante la comparación de la salida del modelo con las

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados

Fecha	Fenómeno asociado
21 de agosto de 2017	Tormentas de verano
25 de octubre de 2017	Frente frío
8 de octubre de 2018	Ciclón tropical (Michael)

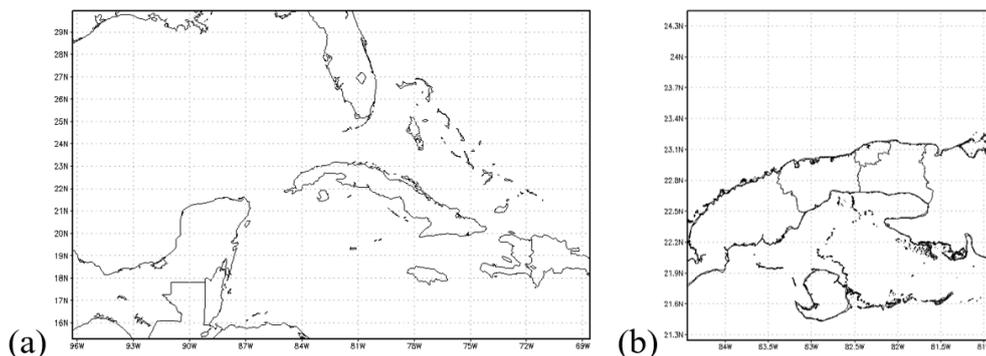


Figura 2. Diseño de los dominios utilizados: a) Dominio 1. b) Dominio 2

Tabla 2. Características de las simulaciones realizadas

Resolución espacial	12 y 4 km
Resolución temporal	3 y 1 h
Cantidad de nodos en la dirección x	256 y 103
Cantidad de nodos en la dirección y	204 y 94
Técnica de anidamiento	Two-way nesting
Paso de integración	60 s
Cantidad de niveles verticales en la atmósfera	35
Cantidad de niveles verticales en el suelo	4
Parametrizaciones de microfísica	WSM5, Morrison 2-M, Lin
Parametrizaciones de cúmulo	GF, (No activado), KF
Parametrización de radiación de onda larga	RRTM scheme
Parametrización de radiación de onda corta	Dudhia scheme
Parametrización de la capa superficial	Monin-Obukhov (Janjic) scheme
Parametrización de la física suelo	Unified Noah land-surface model
Parametrización PBL	Mellor-Yamada-Janjic

mediciones reales de las variables objeto de estudio. Para ello se empleó la metodología de verificación celda-punto, que permite comparar los valores de las observaciones puntuales con los valores pronosticados correspondientes a la celda donde se sitúa la observación. Se utilizó una interpolación lineal para obtener valores en todos los puntos donde hay observación.

Se promediaron los datos de las estaciones por cada zona (costa norte, interior y costa sur), y se tomaron las salidas del dominio de menor resolución (4 km) cada tres horas para hacerlas coincidir con las observaciones de las estaciones meteorológicas. Para la verificación del pronóstico de las variables se calcularon diversos índices estadísticos, con vista a determinar los errores del pronóstico para los casos de estudio seleccionados.

Fueron calculados el sesgo (BIAS) (1), el error absoluto medio (MAE) (2), y el coeficiente de correlación de Pearson (3). También se empleó el error relativo medio (MRE) (4) solo para la velocidad del viento, donde la significación del error fue alta en la mayoría de los casos. Estos estadígrafos permiten medir la precisión de la simulación, que es el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados (P) y valores observados (O).

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{N} \quad (1)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{N} \quad (2)$$

$$pcor = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{std(O)std(P)} \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{O_i} * 100 \quad (4)$$

Donde:

P_i es el valor pronosticado para el punto i

O_i es el valor observado en el punto i

\bar{P} es el promedio de los valores pronosticados

\bar{O} es el promedio de los valores observados

N es el número de valores analizados

std es la desviación estándar

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio: 21 de agosto de 2017

Sobre Cuba predominaba la influencia de las altas presiones oceánicas en superficie, imponiendo vientos de región este. El tránsito por los mares al sur de Cuba de una onda tropical (remanentes de la depresión tropical Harvey) inducía un flujo cálido y húmedo del segundo cuadrante en niveles bajos y medios que, en combinación con una baja fría superior sobre el este del golfo de México, el calentamiento diurno y las condiciones de inestabilidad presentes en el aire superior, favoreció la actividad convectiva en el horario de la tarde.

La presión atmosférica a nivel del mar presentó una marcha diaria caracterizada por mínimos a las 09:00 y

las 18:00 UTC, y máximos entre a las 15:00 UTC y 03:00 UTC. Dicha marcha es reflejada por el modelo con ciertas dificultades, pronosticando de manera pronunciada el mínimo a las 21:00 UTC (Figura 3a). Todas las configuraciones tienden a subestimar el valor de la variable en gran parte del plazo de pronóstico, sobre todo a partir del segundo mínimo, que se refleja en los valores negativos de BIAS (Figura 3b), siendo Lin-KF la configuración que más dista del comportamiento real de la variable.

Al analizar las medidas de error, se aprecia que, a pesar de que las correlaciones son relativamente inferiores (valores entre 0.40 y 0.73) (Figura 3d) respecto a cómo el modelo se comporta generalmente con esta variable, los valores de MAE son pequeños y pocos significativos (entre 0.32 y 0.86 hPa, excepto para la configuración Lin-KF que presentó valores entre 0.77 y 1.42 hPa) (Figura 3c). La configuración que arroja los menores errores y mayores correlaciones es WSM5-GF, mientras que la costa sur es la de mayores errores.

La temperatura del aire presentó una marcha diaria caracterizada por mínimos a las 09:00 y 00:00 UTC y un máximo entre las 18:00 UTC. El modelo refleja el comportamiento de la variable, sobrestimando los valores a partir de las 18:00 UTC en adelante. Las mayores diferencias del modelo con respecto al comportamiento real de la variable se dan en el horario de las 00:00 UTC, coincidiendo con el valor mínimo de la temperatura (Figura 4a). Entre las configuraciones no existe una marcada diferencia, siendo WSM5-GF la de menores errores y mayores correlaciones. En todos los casos las correlaciones lineales son altas, con valores entre 0.87 y 0.94 (Figura 4d). Tanto el BIAS como el MAE aumentan de costa norte a costa sur, siendo, siendo esta última la de mayor significación del error (Figura 4b y 4c). Este resultado puede deberse a condiciones locales propias de la región, donde se producen intercambios a nivel de mesoescala que no son simulados por el modelo. También puede influir en el resultado el hecho de contar con solo dos estaciones, que además se encuentran alejadas de la costa, por lo que existe una combinación de condiciones de interior y costa sur.

El modelo reflejó con dificultad el comportamiento de la variable velocidad del viento, sobrestimando en gran medida los valores en todo el plazo de pronóstico y pronosticando un segundo máximo a las 21:00 UTC que no ocurrió en la realidad. Las mayores diferencias entre el pronóstico y el comportamiento real de la variable se dan en los horarios alejados de este máximo (Figura 5a). En todos los casos la significación del error es alta, con valores de MRE entre 224 y 621%. La configuración WSM5-GF presenta los menores valores de BIAS y MAE excepto para la costa sur (Figuras 5b y 5c). Las correlaciones presentan valores entre 0.39 y 0.58 para la costa norte, y entre 0.60 y 0.93 para el resto de la región (Figura 5d). El error

aumenta de costa norte a costa sur, siendo la costa sur la de mayores dificultades en el pronóstico de esta variable.

La humedad relativa presentó un mínimo a las 18:00 UTC y máximos a las 9:00 y 00:00 UTC. El modelo refleja el comportamiento de la variable, sobrestimando los valores entre las 09:00 y las 18:00 UTC (Figura 6a). El BIAS presenta valores entre -0.02 y 0.87 %, excepto para la configuración Morrison 2-M, que mostró un BIAS negativo de -0.59 % para la región interior (Figura 6b). No existen diferencias significativas entre las tres configuraciones del modelo, con valores de MAE entre 2.87 y 4.91 % (Figura 6c). Los mayores errores se concentran hacia las costas, siendo mayor en la costa sur. La correlación

es alta (entre 0.93 y 0.96), por lo que el modelo refleja en buena medida el comportamiento de la variable mediante una relación lineal (Figura 6d). Los altos valores de correlación, así como los errores poco significativos, evidencian el buen desempeño del modelo en la simulación de la variable humedad relativa en este caso de estudio.

Caso de estudio: 25 de octubre de 2017

A las 12:00 UTC, en el nivel de superficie, se extendía un frente frío desde una baja extratropical localizada sobre las inmediaciones de Nueva York, cruzando por las Bahamas septentrionales y la región occidental de Cuba (por delante una línea de tormen-

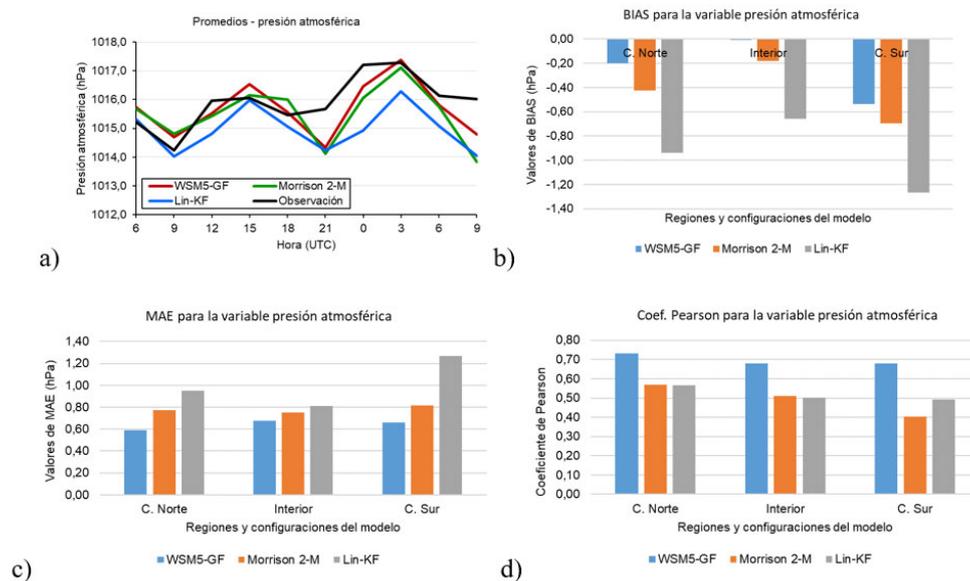


Figura 3. Análisis de la variable presión atmosférica para el caso de estudio del 21 de agosto de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

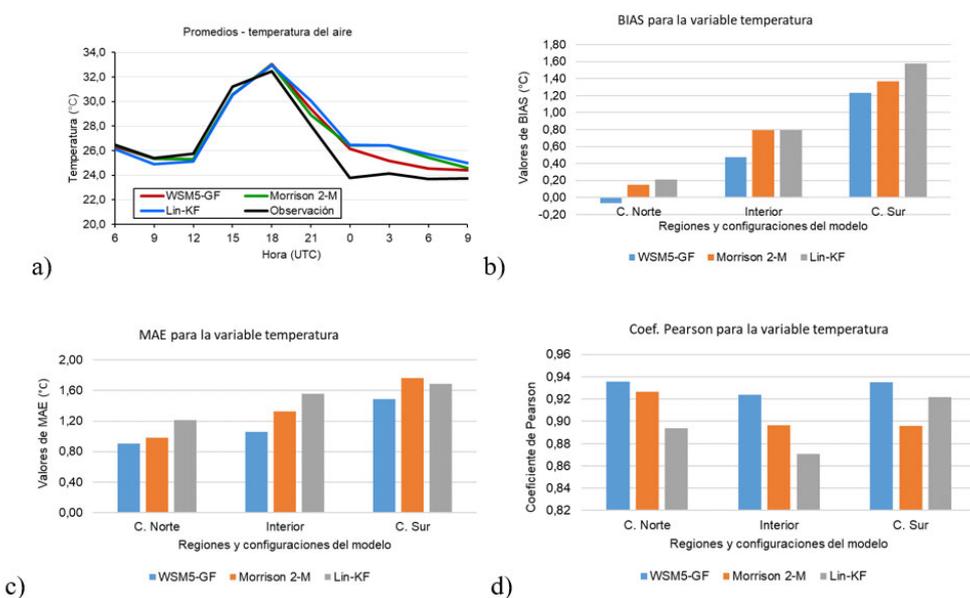


Figura 4. Análisis de la variable temperatura del aire para el caso de estudio del 21 de agosto de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

tas eléctricas), hasta el golfo de Honduras. El paso de este sistema dio lugar a la influencia de las altas presiones de origen continental, imponiendo vientos de región norte.

La presión atmosférica a nivel del mar presentó una marcha diaria caracterizada por mínimos a las 09:00 y 21:00 UTC, y máximos a las 15:00 y 03:00 UTC. El valor de la presión presenta una tendencia al aumento posterior al paso del frente frío, con la llegada de las altas presiones de origen continental (Figura 7a). Dicha marcha es reflejada por el modelo, subestimando el valor máximo a las 15:00 UTC, fundamentalmente hacia la costa sur donde se obtienen valores de BIAS negativos (entre -0.07 y -0.21 hPa) (Figura 7b), y so-

brestimando los valores a partir de las 06:00 UTC del día siguiente. Existen diferencias poco significativas entre las configuraciones del modelo y entre las regiones, siendo la costa norte la de mayores errores en el pronóstico, con valores de MAE entre 0.38 y 0.51 hPa (Figura 7c). Lin-KF resultó ser la mejor configuración para la costa norte y la zona interior, mientras que las correlaciones son altas en todos los casos (superiores a 0.90) (Figura 7d). Las altas correlaciones y los errores pequeños evidencian que el modelo es hábil en el pronóstico de la variable para este caso de estudio.

La temperatura del aire presentó una marcha diaria caracterizada por un mínimo a las 09:00 UTC, un máximo a las 18:00 UTC, y luego un descenso pau-

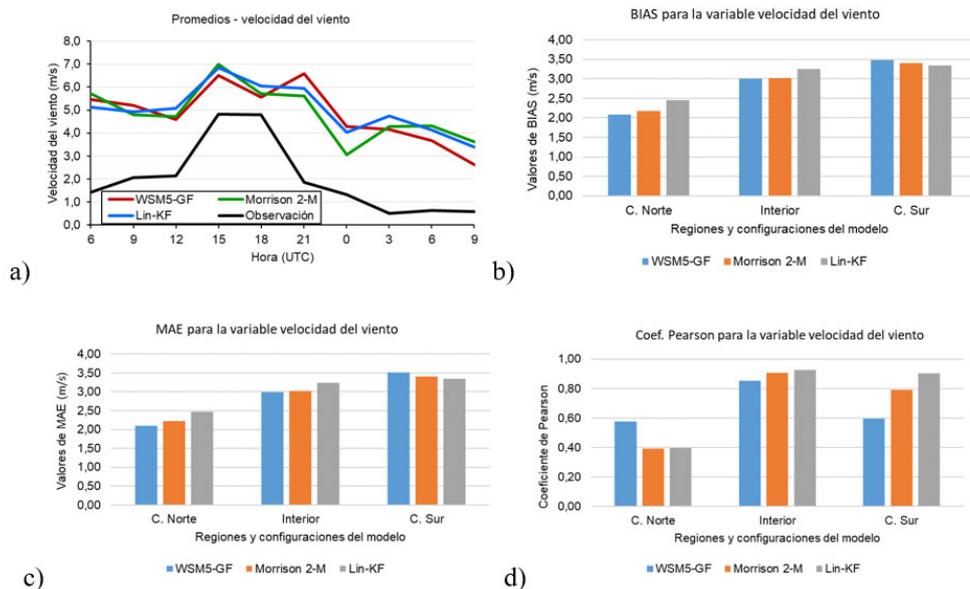


Figura 5. Análisis de la variable velocidad del viento para el caso de estudio del 21 de agosto de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

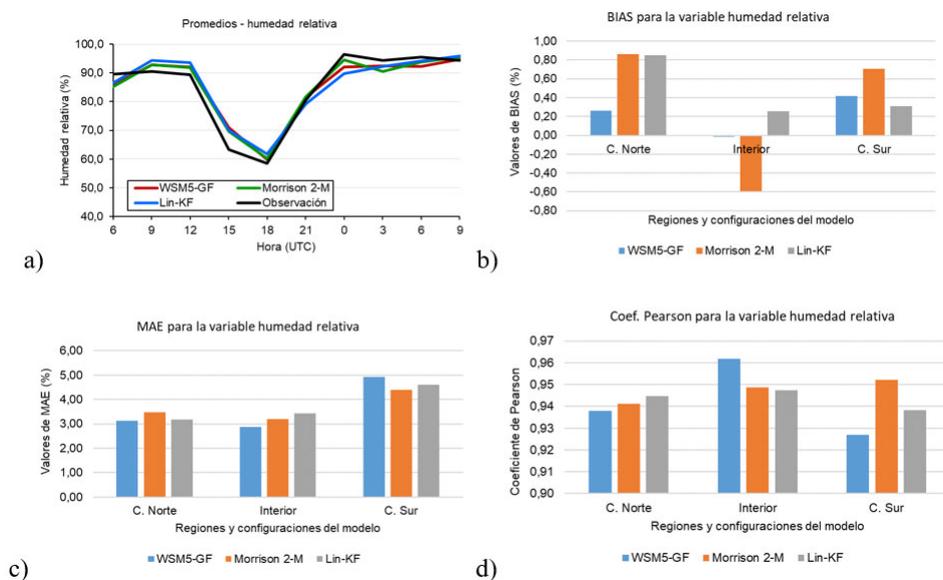


Figura 6. Análisis de la variable humedad relativa para el caso de estudio del 21 de agosto de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

latino producto a la llegada de la masa de aire del anticiclón continental. El modelo refleja en buena medida este comportamiento, con una subestimación del valor de la variable entre las 18:00 y las 03:00 UTC (Figura 8a). Existen diferencias poco significativas entre las configuraciones. Los mayores errores tienen lugar hacia las costas, siendo la costa norte la de mayores errores, con valores de MAE entre 1.48 y 1.61 °C y de BIAS entre -1.48 y -1.61 °C. Los valores negativos de BIAS muestran que se subestima la variable en el interior y en la costa norte (Figuras 8b y 8c). Los errores pocos significativos y las correlaciones altas en todos los casos (entre 0.86 y 0.97) (Figura 8d), evidencian la habilidad del modelo en el pronóstico de la variable.

La velocidad del viento presentó una marcha diaria caracterizada por mínimos a las 06:00 y 09:00 UTC, y un máximo a las 15:00. El modelo refleja este comportamiento sobrestimando en buena medida el valor de la variable en todo el plazo de pronóstico, siendo las 18:00 UTC el horario de mayor sobrestimación cuando se pronostica un máximo que no ocurrió en la realidad (Figura 9a). Al analizar las medidas de error (BIAS y MAE) se aprecia que no existen diferencias significativas entre las configuraciones, siendo Morrison 2-M la configuración con mejores resultados para la costa norte y la zona interior (Figuras 9c y 9d). Las mejores correlaciones se dan hacia el interior y la costa sur (valores entre 0.86 y 0.98) (Figura 9d), sin embargo, la costa norte es la de mejor pronóstico

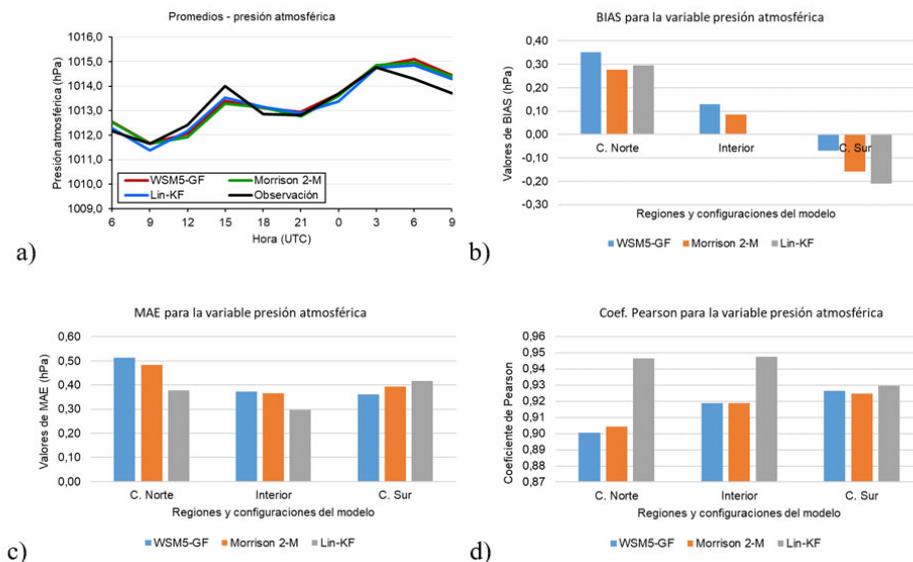


Figura 7. Análisis de la variable presión atmosférica para el caso de estudio del 25 de octubre de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

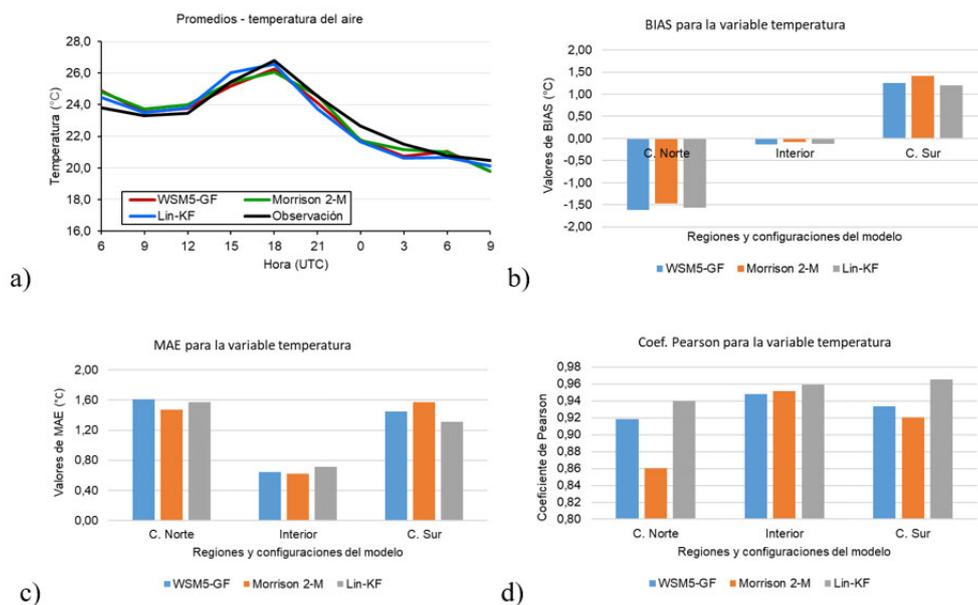


Figura 8. Análisis de la variable temperatura del aire para el caso de estudio del 25 de octubre de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

por la baja significación de los errores, con valores de MRE entre 14.96 y 33.23 %. Hacia la zona interior el MRE toma valores entre 296.68 y 371.77 %.

La humedad relativa presentó una marcha diaria caracterizada por valores máximos a las 09:00 y 03:00 UTC, y un valor mínimo a las 18:00 UTC. El modelo refleja este comportamiento sobrestimando el valor de la variable (Figura 10a). Al analizar las medidas de error se aprecia que Lin-KF presenta los menores valores de BIAS (entre 0.65 y 8.76 %) y MAE (entre 4.69 y 8.97 %) (Figuras 10b y 10c). El error aumenta de costa sur a costa norte, siendo, por tanto, la costa norte la de mayor significación del

error, precisamente hacia donde se dan las mayores precipitaciones al paso del frente frío. En todos los casos, las correlaciones son altas, con valores entre 0.84 y 0.94, lo que muestra que el modelo refleja bien el comportamiento de la variable a través de una relación lineal (Figura 10d).

Caso de estudio: 8 de octubre de 2018

A las 18:00 UTC el huracán Michael, categoría 1 en la escala Saffir-Simpson, ejercía su influencia sobre la región occidental de Cuba. El centro del sistema se ubicaba al oeste de la provincia de Pinar del Río,

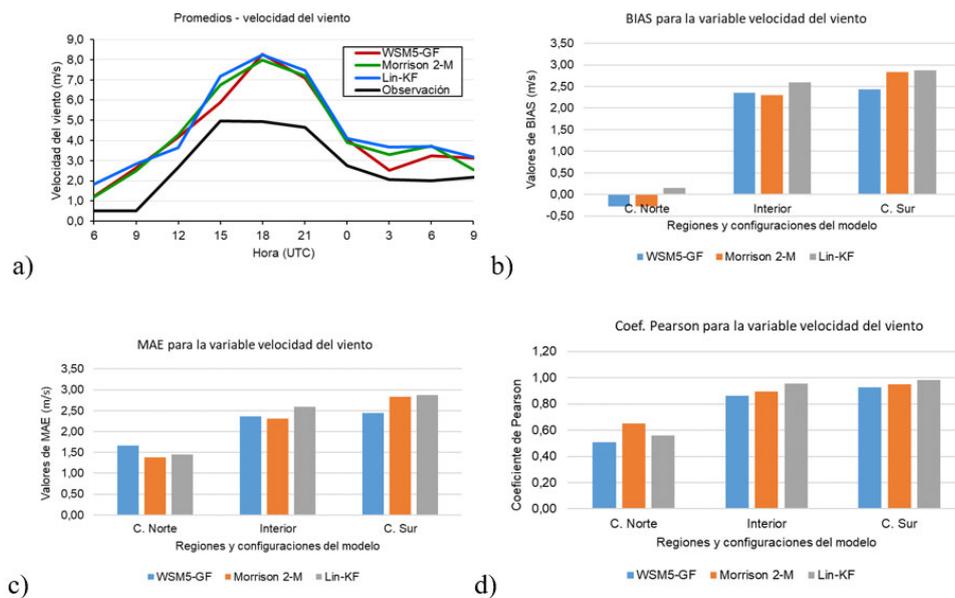


Figura 9. Análisis de la variable velocidad del viento para el caso de estudio del 25 de octubre de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

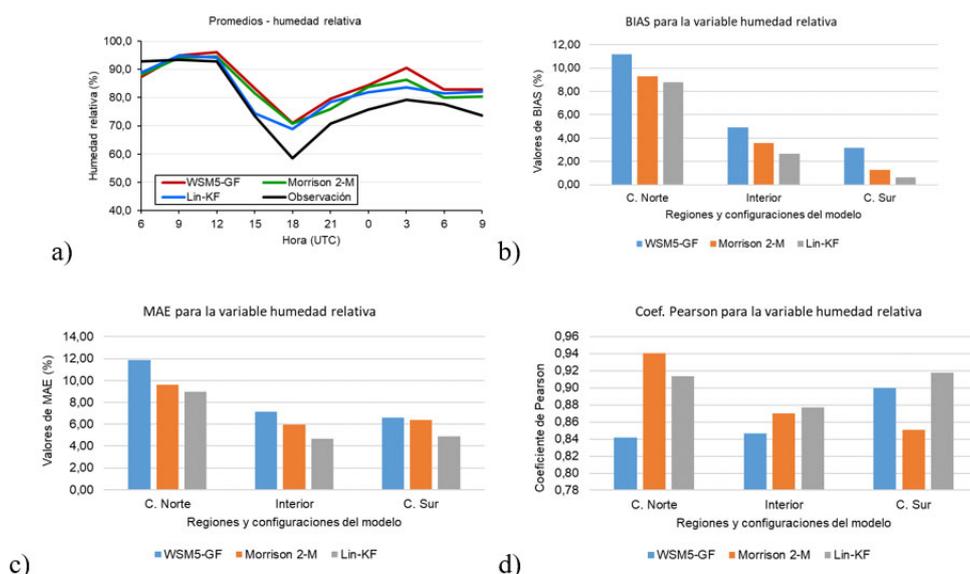


Figura 10. Análisis de la variable humedad relativa para el caso de estudio del 25 de octubre de 2017: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

próximo al Cabo de San Antonio, y se encontraba bien estructurado en la vertical.

La presión atmosférica a nivel del mar presentó una marcha diaria caracterizada por una tendencia a la disminución del valor de la variable por la aproximación del huracán Michael, con valores mínimos a las 09:00 y a las 21:00 UTC, y máximos a las 12:00 y 03:00 UTC. Dicha marcha es reflejada por el modelo, subestimando el valor de la variable en todo el plazo de pronóstico, siendo la configuración Lin-KF la que mejor se aproxima al comportamiento real. Las mayores diferencias entre el pronóstico y la observación se dan en los horarios de los máximos (Figura 11a). Al analizar las medidas de error, se aprecia que los menores valores de BIAS (entre -0.29 y 0.70 hPa) y de MAE (entre 0.59 y 0.70 hPa) los posee la configuración Lin-KF (Figuras 11b y 11c), que a su vez posee las mejores correlaciones, con valores entre 0.83 y 0.87 (Figura 11d). El error aumenta ligeramente de costa norte a costa sur, siendo esta última la región donde el modelo tiene menor habilidad.

La temperatura del aire presentó una marcha diaria caracterizada por un mínimo a las 09:00 UTC y un máximo a las 18:00 UTC, para luego mantenerse con muy poca variación, producto a la nubosidad asociada al ciclón tropical. El modelo refleja este comportamiento, pero sobrestimando el valor de la variable, siendo significativa esta sobrestimación en el horario entre las 15:00 y las 00:00 UTC (Figura 12a). Al analizar las medidas de error se aprecia que existen diferencias pocos significativas entre las configuraciones, siendo Lin-KF la de menores valores de BIAS (entre 1.07 y 1.53 °C) y MAE (entre 1.07 y 1.60 °C) (Figuras 12b y 12c), y al mismo tiempo la de menores correlaciones. Los mayores errores tienen lugar hacia las costas, fundamentalmente hacia la costa sur. El índice

de correlación presenta valores entre 0.88 y 0.97, por lo que el modelo refleja bien el comportamiento de la variable mediante una relación lineal (Figura 12d).

La velocidad del viento presentó una marcha diaria caracterizada por un mínimo a las 09:00 UTC, y un máximo a las 00:00 UTC. El modelo refleja con dificultades este comportamiento, sobrestimando en buena medida el valor de la variable en todo el plazo de pronóstico, y desplazando el máximo hacia las 21:00 UTC (Figura 13a). La significación del error es alta con valores de MRE entre 37.56 y 202.56%. Los errores son mayores hacia la zona interior, con valores de BIAS y de MAE entre 4.36 y 4.64 m/s, mientras que no existen diferencias significativas entre las configuraciones del modelo (Figuras 13b y 13c). Las correlaciones presentan valores entre 0.80 y 0.92, por lo que se refleja bien el comportamiento de la variable mediante una relación lineal (Figura 13d).

La humedad relativa se mantuvo por encima del 89 % durante todo el plazo de pronóstico, con mínimos a las 18:00 y las 03:00 UTC, y máximos a las 09:00 y 21:00 UTC. El modelo reflejó con ciertas dificultades este comportamiento, sobrestimando el valor de la variable durante todo el plazo de pronóstico, siendo significativa esta sobrestimación entre las 18:00 y las 00:00 UTC (Figura 14a). No existen diferencias significativas entre las configuraciones del modelo, siendo Lin-KF mejor para el pronóstico en la zona interior y la costa sur, con valores de BIAS entre -2.95 y -5.92 % (Figura 14b). El MAE presenta valores entre 4.10 y 9.77 % (Figura 14c), mientras que las correlaciones presentan valores entre 0.60 y 0.73 hacia la zona interior, y entre 0.33 y 0.50 hacia las costas, lo que demuestra las dificultades del modelo en la representación del comportamiento de la variable mediante una relación lineal (Figura 14d).

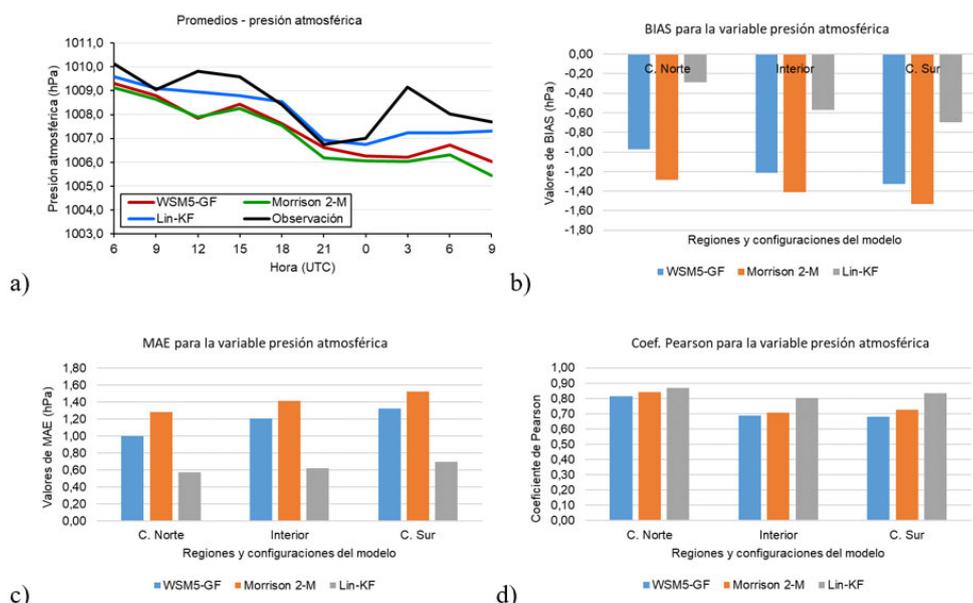


Figura 11. Análisis de la variable presión atmosférica para el caso de estudio del 8 de octubre de 2018: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

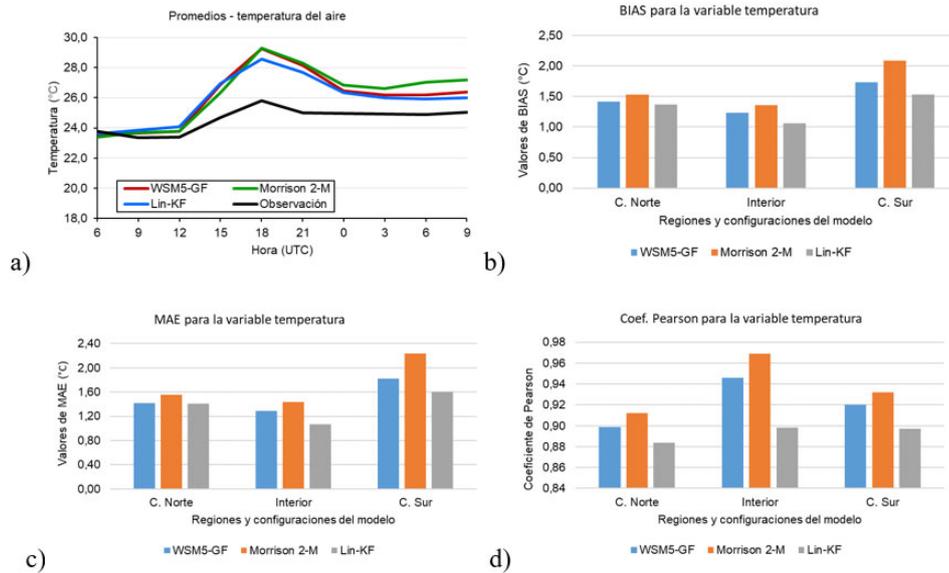


Figura 12. Análisis de la variable temperatura del aire para el caso de estudio del 8 de octubre de 2018: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

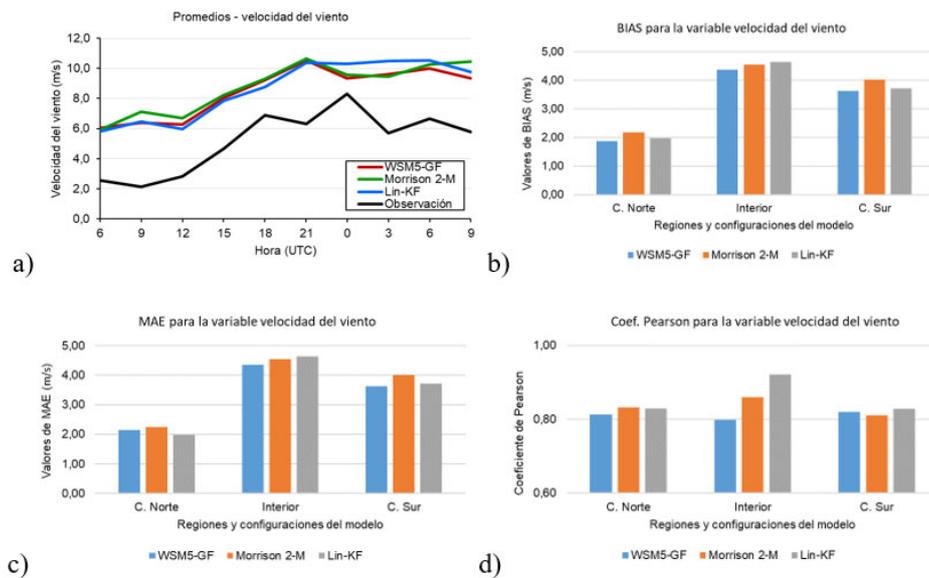


Figura 13. Análisis de la variable velocidad del viento para el caso de estudio del 8 de octubre de 2018: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

CONCLUSIONES

Con la verificación de los casos de estudio se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El mejor desempeño del modelo se observó en el pronóstico de la variable presión atmosférica, donde se obtuvo valores promedios de MAE de 0.76 hPa y de BIAS de -0.50 hPa.
- Para las variables presión atmosférica y temperatura del aire se obtuvo los mayores errores en el caso de estudio de ciclón tropical, mientras que para la variable velocidad del viento se obtuvo en la

tormenta de verano, y para la humedad relativa en el caso de frente frío.

- Se observó, en todos los casos analizados, una sobreestimación de la velocidad del viento, siendo la variable de peor desempeño del modelo con un error relativo medio entre 14 y 621 %.
- Las estaciones localizadas en la costa sur mostraron los mayores errores de pronóstico en la mayoría de casos.
- Se observaron ligeras diferencias entre las configuraciones utilizadas en el modelo. Para el caso de tormenta resultó con mejor desempeño la combina-

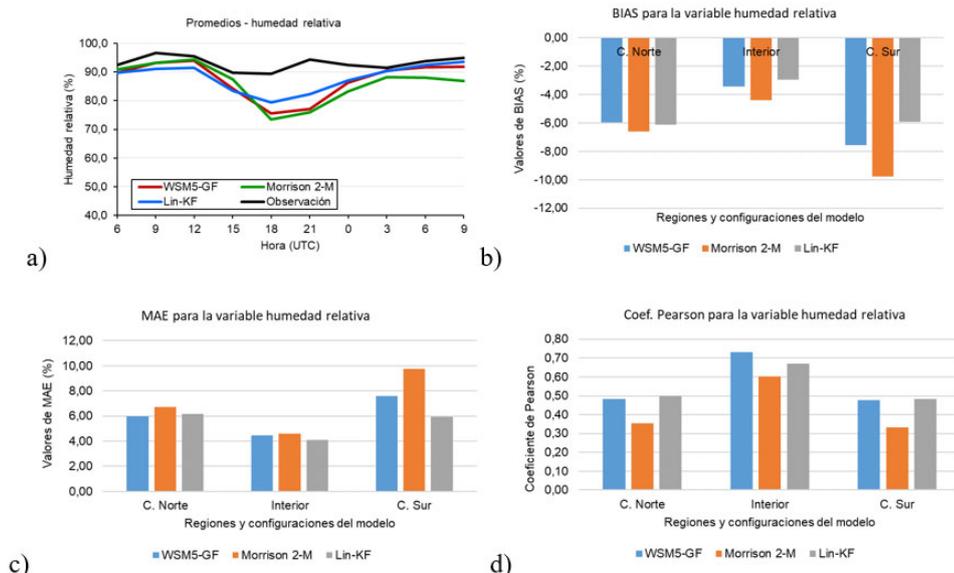


Figura 14. Análisis de la variable humedad relativa para el caso de estudio del 8 de octubre de 2018: a) Promedios, b) BIAS, c) MAE, d) Coeficiente de correlación de Pearson

ción de parametrizaciones de microfísica WSM5 y de cúmulos Grell-Freitas. En el caso asociado a un frente frío no se observaron diferencias relevantes entre las configuraciones mientras que, para el ciclón tropical, la combinación de parametrizaciones de microfísica Lin *et al.* y de cúmulos Kain-Fritsch mostró los mejores resultados de manera general.

REFERENCIAS

- Barcia, S., Ballester, M., Cedeño, Y., García, E., González, J., & Regueira, V. (2012). *Variabilidad espacio-temporal de las variables que intervienen en los pronósticos a corto plazo en Cuba*. Informe de Proyecto: "Evaluación de los Pronósticos del Tiempo", Instituto de Meteorología.
- Díaz, Y., & Díaz, O. (2010). *Evaluación del pronóstico numérico del tiempo a corto plazo para Cuba con el modelo de mesoescala MM5V3*. Trabajo de Diploma, Universidad de La Habana, InSTEC, La Habana.
- Félix, J., González Ramírez, C. M., Hernández, J. F., & González Jardines, P. M. (2017). *Estructura interna de las tormentas que generan tiempo severo a partir del modelo WRF-ARW*. Tesis de Diploma, Universidad de La Habana, InSTEC, La Habana.
- Fuentes, T., González Ramírez, C. M., González Jardines, P. M., & Fernández, J. C. (2019). *Análisis de la formación y evolución de nubes convectivas mediante el Índice Gálvez Davison a partir del WRF*. Tesis de Diploma, Universidad de La Habana, InSTEC, La Habana.
- González Ramírez, C. M., González Jardines, P. M., & Hernández, J. F. (2017). Evaluación de la afectación del huracán Irma, utilizando la modelación numérica en las provincias de Artemisa y Mayabeque. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3), 363-377.
- Moreno, S., González, C. M., & Ferrer, A. L. (2017). Verificación del pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF para las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2), 148-163.
- Moya, A., & Ortega, J. M. (2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apunt. Cienc. Soc.*, 15(1), 135-145. doi: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015021>
- Pérez, A., Mitrani, I., & Díaz, O. (2014). *Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera para la República de Cuba*. Informe de Resultado Científico, Instituto de Meteorología, Centro de Física de la Atmósfera.
- Sánchez, E. O., Álvarez, L., & Ferrer, A. L. (2018). *Evaluación del pronóstico a mediano plazo de la componente atmosférica del SPNOA con datos de estaciones meteorológicas del INSMET*. Tesis de Diploma, Universidad de La Habana, InSTEC, La Habana.
- Sierra, M., Borrajero, I., Ferrer, A. L., Morfa, Y., Morejón, Y., & Hinojosa, M. (2017). *Estudios de sensibilidad del SisPI a cambios de la PBL, la cantidad de niveles verticales y, las parametrizaciones de microfísica y cúmulos, a muy alta resolución*. Proyecto: "Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos II", Instituto de Meteorología, Centro de Física de la Atmósfera.
- Sierra, M., Ferrer, A. L., Hernández, R., González, Y., Cruz, R. C., Borrajero, I., & Rodríguez, C. F. (2014). *Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios*. Proyecto: "Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos", Instituto de Meteorología, Centro de Física de la Atmósfera.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución de autores: **Análisis formal:** Christian Lam Cervantes, Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines. **Conceptualización:** Christian Lam Cervantes, Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines. **Conservación de datos:** Christian Lam Cervantes, Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines. **Redacción - primera redacción:** Christian Lam Cervantes. **Redacción - revisión y edición:** Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines. **Investigación:** Christian Lam Cervantes. **Metodología:** Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines. **Supervisión:** Carlos M. González Ramírez, Pedro M. González Jardines

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/)