

Evaluación de algoritmos de pronóstico de visibilidad aplicados al Sistema de Pronóstico Inmediato

Visibility algorithms forecast evaluation applied to Nowcasting Forecast System.



CU-ID: 2377/v28n1e02

 Pedro Manuel González Jardines^{1*},  Maibys Sierra Lorenzo²,  Carlos Manuel González Ramírez³

¹Jose Martí ,International Airport, Boyeros Ave, Havana, Cuba.

²Center for Atmospheric Physics, Institute of Meteorology, Casablanca, Havana, Cuba.

³Provincial Meteorological Center La Habana-Artemisa-Mayabeque. Institute of Meteorology, Casablanca, Havana, Cuba.

RESUMEN: La presente investigación evalúa la habilidad del modelo mesoescalar WRF, núcleo fundamental del proyecto SisPI (Sistema de Pronóstico Inmediato), para pronosticar un evento de niebla ocurrido el 4 de enero de 2019 sobre una porción de la región occidental de Cuba. Para ello se utilizan 8 algoritmos empíricos que permiten estimar la visibilidad horizontal, introduciendo modificaciones a uno de ellos. Se emplean dos horarios de inicialización (00:00 y 06:00 UTC), para analizar cuán cerca o lejos de la inicialización, el pronóstico es más efectivo. La evaluación se efectúa mediante una estrategia de verificación celda-punto, de conjunto con un análisis binario del suceso, al cual se trata de forma combinada como niebla/neblina, debido a la subjetividad inherente a las mediciones de la visibilidad. Los eventos de niebla/neblina pronosticados fueron más cortos en relación con la realidad. Se obtiene una sobreestimación del campo de viento, lo cual se considera el principal factor limitante para la obtención de pronósticos más acertados y condicionante a disipaciones tempranas. Los resultados indican que los algoritmos que incluyen la humedad relativa y la depresión del punto de rocío son los de mejor comportamiento sobre el área de estudio. En el caso de estos últimos la aplicación de un factor de inhibición basado en la cizalladura del viento en los niveles próximos a la superficie puede conducir a pronósticos más certeros.

Palabras clave: niebla, neblina, algoritmos, WRF, SisPI.

ABSTRACT: This research evaluate the WRF mesoscale model performance, inner core of SisPI project (Nowcasting System), to forecast a fog/haze event occurred at January 4th, 2019 on a Cuban west portion. For that 8 empirical algorithms that allow estimate the horizontal visibility was employed, introducing modifications to one of them. Two initialization times was used, for to evaluate how close or far the forecast is more realistic. The evaluation is made with a mesh-point strategy together a binary event analysis. The fog/haze events was analyzed combined way, caused by the visibility measurements have an important subjective component. The forecasted fog/haze events was shorter comparing with the observations. The wind field overestimation is considered the main limitant factor for obtain more realistic forecasts and conductive for earlier dissipations. The results suggests that the relative humidity and dew point depression algorithms give more realistic forecast on the study area. In these cases the inclusion of an inhibition wind shear factor is conductive to better forecast.

Keywords: fog, haze, algoritms, WRF, SisPI.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1992), define la niebla como la suspensión en el aire de gotas muy pequeñas de agua, habitualmente microscópicas, que reducen la visibilidad horizontal en la superficie terrestre a menos de 1 km (kilómetro). Bajo las mismas circunstancias, si la visibilidad resulta mayor de 1 km, pero menor de 5 km, el fenómeno se conoce como neblina.

La aparición de eventos de niebla/neblina está asociada a un conjunto de factores entre los que se incluyen el patrón sinóptico que influye sobre el área de interés, las características dinámicas de la capa fronteriza y las condiciones locales del terreno, por solo mencionar algunos, lo cual dificulta su pronóstico en una amplia variedad de circunstancias (Jansá, 1974; Bergot & Guedalia, 1993).

*Autor para correspondencia: Pedro Manuel González Jardines. E-mail: pedro.met90@gmail.com

Recibido: 19/08/2021

Aceptado: 20/01/2022

La mayor parte de los estudios relacionados con estos fenómenos en Cuba han estado asociados al empleo de la climatología. Esto se debe en gran medida a las limitaciones observacionales del servicio meteorológico nacional, ante la imposibilidad de contar con sondeos o sensores que permitan hacer un estudio más detallado de las características asociadas a su génesis, evolución y disipación debido a sus altos costos. En la actualidad solo se cuenta con la red de estaciones del servicio meteorológico, la cual no es lo suficientemente densa como para monitorear estos fenómenos a lo largo de la nación.

Los trabajos desarrollados por (Alfonso, 1980; Alfonso & Florido, 1993) fueron el punto de partida en las investigaciones nacionales, ya que detectaron que sobre el territorio nacional predominan las nieblas/neblinas de radiación. También lograron constatar que los episodios de neblinas son más frecuentes y pueden ocurrir durante todo el año, mientras que las nieblas son más comunes en el período poco lluvioso del año, comprendido entre noviembre-abril.

Los estudios desarrollados por (Álvarez *et al.*, 2011) identifican la marcha de los fenómenos de niebla/neblina a partir de los datos de tiempo presente asentados en las 67 estaciones meteorológicas que cuenta el país. De esta forma obtuvieron mapas de distribución de la marcha diaria, anual e interanual sobre la isla. Otros trabajos como (Ledesma & Balestriola 2003; Maura, 2008; Acosta, 2012) desarrollaron investigaciones similares, identificando patrones asociados a la irradiación nocturna en situaciones de débil gradiente bórico como favorables para el desarrollo de nieblas/neblinas. Coinciden estos autores además con que la mayor frecuencia de aparición está enmarcada hacia el horario de las 12:00 UTC.

Como resultado de estos estudios actualmente los procesos de niebla/neblina en el país se pronostican basados en dos métodos fundamentales. El primero está relacionado con la persistencia de patrones generadores y el segundo está asociado a la climatología, donde se hace una evaluación de la frecuencia e intensidad de acuerdo a la época del año. Ninguno de estos considera los procesos dinámicos asociados al fenómeno y, en ambos casos, se le da más peso al volumen de datos disponibles. Estos ejemplos permiten constatar el carácter limitado que han tenido estas investigaciones en la nación caribeña.

En el ámbito internacional el estudio de las nieblas ha acaparado mayor atención. (Kunkel, 1984) estableció una relación entre la concentración del contenido de agua líquida y un coeficiente de extinción de luz para obtener un estimado de la visibilidad horizontal. En las décadas siguientes varios autores, siguiendo una filosofía similar, han implementado nuevos algoritmos que permiten estimar la visibilidad horizontal, los cuales también están relacionados con variables como la humedad relativa, la temperatura ambiente y la temperatura del punto de rocío (Stoelinga & War-

ner, 1999; Gultepe *et al.*, 2006; Gultepe & Milbrandt 2009; Creighton *et al.*, 2014).

La modelación numérica, con un desarrollo vertiginoso en las últimas décadas ha intervenido en las investigaciones con fines predictivos. Entre los ejemplos que confirman esta idea se puede citar a (Bang *et al.*, 2009), quienes compararon 4 algoritmos empíricos para estimar la visibilidad horizontal obtenidos a partir de salidas del modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting). Para ello analizaron 48 eventos de niebla registrados en los aeropuertos de Korea del Sur entre 2003 y 2006, obteniendo que dado el carácter empírico de dichas formulaciones, la inclusión de un factor de estacionalidad a los coeficientes de las relaciones, basado en un análisis armónico, conduce a resultados satisfactorios. También determinaron que las relaciones que combinan las concentraciones de hidrometeoros con la depresión del punto de rocío y la humedad relativa son las más robustas para su área de estudio.

Otro estudio significativo en este sentido fue el desarrollado por (Lin *et al.*, 2017), quienes evalúan nueve algoritmos empíricos para estimar la visibilidad horizontal y su comportamiento con varias parametrizaciones de microfísica, radiación y capa fronteriza hasta obtener la mejor configuración, tomando como caso de estudio un evento de niebla de advección sobre el aeropuerto internacional de Shanghai. En este artículo los investigadores obtienen que un algoritmo que asocia las variaciones de la humedad relativa con las concentraciones de hidrometeoros y la cizalladura del viento en niveles bajos exhibe los resultados más realistas, obteniendo además que un autoajuste de aproximadamente 12 horas es preciso para pronosticar la niebla de advección.

Autores como (Román Cascón, 2016; de Paula *et al.*, 2017; Changshuo *et al.*, 2020), han trabajado en la evaluación de diferentes parametrizaciones de capa fronteriza en el pronóstico de eventos de niebla, encontrando una baja correlación en los pronósticos obtenidos en relación al viento en contraste con lo que ocurre con la temperatura; coincidiendo con el hecho de que existe cierta tendencia a la subestimación de los valores de humedad relativa particularmente en condiciones de saturación.

Estos constituyen apenas unos pocos ejemplos, pero demuestran la necesidad y la posibilidad de implementar nuevas técnicas, vinculadas a la modelación numérica, que permitan incrementar las capacidades predictivas de los eventos de niebla/neblina en el territorio nacional.

La presente investigación propone en un primer momento evaluar la habilidad de SisPI para pronosticar algunas variables relacionadas con el ambiente bajo el cual se desenvuelven los episodios de nieblas/neblinas, las cuales de alguna manera también forman parte de las formulaciones de los algoritmos empleados en el cálculo de la visibilidad horizontal. En segunda ins-

tancia se procede a la verificación de 8 algoritmos que permiten estimar la visibilidad horizontal, obtenidos a partir de las salidas de SisPI. El objetivo principal es determinar cual, o cuales, tienen mayor habilidad de pronóstico sobre el área de estudio y cuán dependiente del pronóstico del ambiente sinóptico pueden ser sus resultados. Esta investigación constituye el primer paso en la implementación de un método directo de predicción de la visibilidad horizontal en el ámbito nacional, lo cual conduce a un pronóstico numérico de situaciones de niebla/neblina empleando la configuración SisPI.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio esta enmarcada en las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque, las cuales se localizan en la porción occidental del país y cuentan con un total de 10 estaciones meteorológicas convencionales (figura 1). En esta región los fenómenos de niebla/neblina están relacionados con la proximidad de sistemas frontales en el golfo de México, donde el anticiclón subtropical impone un débil flujo del segundo cuadrante (región sudeste) que favorece el incremento de la humedad antes de la llegada del frente frío. También suelen aparecer en situaciones de marcado dominio anticiclónico, donde la presencia de débiles gradientes de presión se combina con una fuerte irradiación nocturna (Sosa *et al.*, 1992; Alfonso & Florido, 1993).

2.2 Configuración del modelo

Para desarrollar los experimentos se empleó el modelo WRF con el núcleo dinámico ARW (Advanced Research WRF) en su versión 3.8.1; el cual constituye el elemento fundamental del proyecto SisPI (Sistema de Pronóstico Inmediato) (Sierra *et al.*, 2014). Dicho sistema trabaja operativamente en el Instituto de Meteorología (InsMet) y tiene como objetivo fundamental el pronóstico a muy corto y corto plazo. Cuenta con dos dominios anidados bidireccionalmente de 27 y 9 km respectivamente y un dominio de 3 km de resolución anidado unidireccionalmente empleando la herramienta ndown (figura 1).

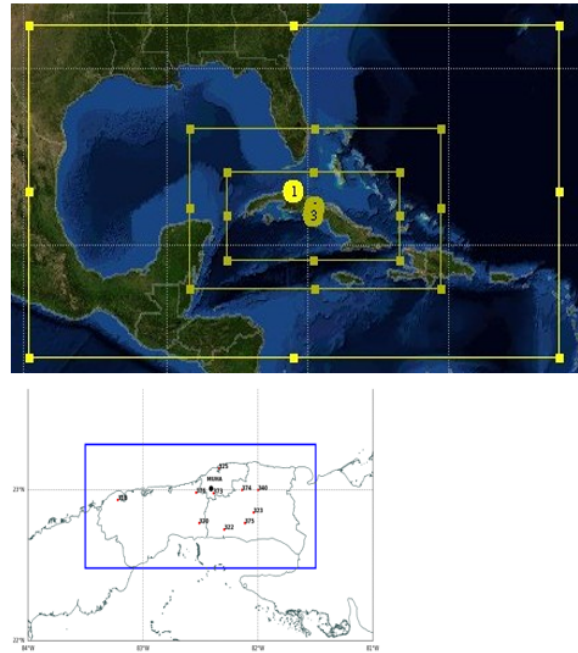


Figura 1. Dominios usados en SisPI y área de estudio (recuadro azul); (1) 27 Km, (2) 9 Km, (3) 3 Km .

Los dominios de 27 y 9 km generan pronósticos cada tres horas, mientras que el dominio de 3 km los imprime cada una hora. El modelo fue inicializado a partir de datos de pronóstico del GFS (Global Forecast System) con 0.5° de resolución horizontal.

La configuración propuesta por SisPI incluye varias parametrizaciones, que varían ligeramente sobre el dominio de mayor resolución (Sierra *et al.*, 2014). Estas incluyen los esquemas de microfísica WSM5 (Hong *et al.*, 2004) y Morrison de doble momentum (Morrison *et al.*, 2009); MYNN2.5 como esquema de capa límite (Nakanishi & Niino, 2006); el esquema de cúmulos Grell-Freitas (Grell *et al.*, 2013); los esquemas de radiación de onda corta Dudhia (Dudhia, 1984) y Goddard (Chou & Suarez, 1994), el de onda larga RRTM (Mlawer *et al.*, 1997) y finalmente los esquemas Monin-Obukhov y Unified Noah land-surface model (Chen & Dudhia, 2001). La tabla 1 a continuación ilustra de forma detallada como se distribuyen dichas parametrizaciones en cada uno de los dominios de SisPI.

Tabla 1. Algunos esquemas de parametrizaciones físicas empleados por SisPI para los tres dominios. (Sierra *et al.*, 2014, 2016)

Parametrizaciones	Dominio 27 Km	Dominio 9 Km	Dominio 3 Km
Microfísica	WSM5	WSM5	Morrison 2-moment
Cúmulos	Grell-Freitas	Grell-Freitas	No activa
Capa límite	MYNN 2.5	MYNN 2.5	MYNN 2.5
Radiación onda corta	Dudhia	Dudhia	Goddard
Radiación onda larga	RRTM	RRTM	RRTM
Frontera superficial	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
Superficie	Unified Noah land-surface model	Unified Noah land-surface model	Unified Noah land-surface model

Dado que los modelos numéricos requieren de un tiempo de autoajuste, se evalúan las corridas inicializadas a las 00:00 y 06:00 UTC, para estudiar cuán cerca, o lejos, del momento de inicialización el modelo realiza el pronóstico más acertado.

2.3 Datos observacionales

Se seleccionó el evento de niebla/neblina de radiación ocurrido el 4 de enero de 2019, el cual afectó todas las estaciones del área de estudio y en la mitad de ellas redujo la visibilidad a menos de 300 metros, llegando a ser menor de 50 metros en algunos puntos como el aeropuerto internacional José Martí (figura 1).

Los datos de temperatura, viento y humedad relativa en superficie fueron obtenidos a partir de las mediciones correspondientes en las estaciones meteorológicas convencionales (figura 1). En relación a la evaluación de la visibilidad, se tiene en cuenta el carácter altamente subjetivo de su medición. Esto se debe a que, principalmente en los horarios donde se reporta neblina, como la manifestación del fenómeno es parcial, muchas veces el valor de visibilidad asentado no coincide con la definición de niebla o neblina que provee la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992), pues se registra la visibilidad general y no la reducida debido a la presencia del fenómeno. Por este motivo se decidió emplear el dato de tiempo presente para evaluar la efectividad de los algoritmos propuestos.

2.4 Algoritmos empleados

Varios algoritmos han sido propuestos para estimar la visibilidad horizontal, sin embargo su principal desventaja radica en el hecho de que cuentan con coeficientes empíricos que fueron obtenidos basados en mediciones hechas en los Estados Unidos (Bang *et al.*, 2009). Por esta razón es preciso, en primer lugar, identificar aquel que mejor desempeño tenga sobre el área de estudio. Los algoritmos empleados en la presente investigación son relacionados a continuación. Se aclara que en este artículo se decide no hacer cambios a las abreviaturas relacionadas con ellos encontradas en artículos científicos o códigos donde están formulados en aras de mantener la homogeneidad de sus nomenclaturas:

([Stoelinga & Warner, 1999](#))

$$SW_{99} = \frac{-\ln(0.02)}{B} \quad (1)$$

donde

$$B=B_{cw}+B_{rw}+B_{ci}+B_{sn}$$

Este algoritmo está basado en los estudios de ([Kunkel, 1984](#)), quien obtuvo que existe una correlación

lineal entre el contenido de agua líquida en suspensión próxima a la superficie y un coeficiente de extinción. Esto se traduce en que un incremento en la cantidad de partículas en suspensión implica un aumento de dicho coeficiente y, por ende, una reducción de la visibilidad horizontal. Con similar filosofía, ([Stoelinga & Warner, 1999](#)) amplían el número de hidrometeoros que pueden contribuir al incremento del coeficiente de extinción. De esta forma obtienen los coeficientes de extinción debido al agua líquida (B_{cw}), la lluvia (B_{rw}), el hielo (B_{ci}) y la nieve (B_{sn}) (ecuación 1.2 y 1.3)

$$B_{(cw)} = 144.7(C_{(cw)})^{0.88} \quad (1.2)$$

$$B_{(rw)} = 1.1(C_{(rw)})^{0.75}$$

$$B_{(ci)} = 163.9C_{(ci)} \quad (1.3)$$

$$B_{(sn)} = 10.4(C_{(sn)})^{0.78}$$

Donde C es la concentración de masa que corresponde a cada uno de los diferentes hidrometeoros expresada en g/m^3 , la cual es obtenida a partir de los valores de razones de mezcla correspondientes disponibles en las salidas del WRF.

([Creighton *et al.*, 2014](#))

$$AFWA_{\text{metros}} = \min(Vis_{\text{niebla}}, Vis_{\text{hidrometeoros}}, Vis_{\text{polvo}}) \quad (2)$$

$$Vis_{\text{niebla}} = 1500 \cdot (105 \cdot rh) \cdot (5/mix) \quad (2.1)$$

$$Vis_{\text{hidrometeoros}} = \frac{-\ln(0.02)}{1.1((C_r + C_g)^{0.75}) + 10.36C_n^{0.78}} \quad (2.2)$$

Este es un algoritmo de diagnóstico que emplea la AFWA (Air Force Weather Agency) (ecuación 2), el cual toma el valor mínimo entre la visibilidad estimada debido a hidrometeoros (ecuación 2.2) y a niebla/neblina (ecuación 2.1).

Aquí rh y mix constituyen la humedad relativa y la razón de mezcla respectivamente, pronosticada a dos metros de altura en ambos casos. Por otra parte, a diferencia de la propuesta de ([Stoelinga & Warner, 1999](#)), el coeficiente de extinción reflejado en el denominador de la (ecuación 2.2) emplea solamente las concentraciones de lluvia (C_r), graupel (C_g) y nieve (C_n) con leves modificaciones en los coeficientes respecto a las (ecuaciones 1.2 y 1.3).

No se contempla en esta investigación la reducción de visibilidad debido a polvo pues para ello el WRF necesita tener acoplado el paquete químico Chem (Chemical).

(Benjamin, 1999)

$$UPP1 = \frac{-\ln(0.02)}{B_{UPP}} \quad (3)$$

donde

$$B = B_{cw} + B_{rw} + B_{ci} + B_{sn} + B_{gp}$$

Este algoritmo es empleado en el software Unified Post-Procesor en su versión 2.2 e introduce ligeras modificaciones en las constantes que se emplean para calcular los diferentes coeficientes de extinción respecto a la propuesta de (Stoelinga & Warner, 1999), (ecuación 3.1 y 3.2), además que incluye las concentraciones de graupel. Esta metodología fue hallada en el programa CALVIS.f del código fuente del UPP 2.2.

$$\begin{aligned} B_{(rw)} &= 2.24(C_{(rw)})^{0.75} \\ B_{(ci)} &= 327.8C_{(ci)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} B_{(sn)} &= 10.36(C_{(sn)})^{0.7776} \\ B_{(gp)} &= 4(C_{(gp)})^{0.75} \end{aligned} \quad (3.2)$$

(Doran J. A. et al., 1999)

$$Vis_{FSL} = 1.609 * 6000 * \frac{T - Td}{rh^{1.75}} \quad (4)$$

Este algoritmo plantea que la visibilidad puede ser obtenida a partir de una relación entre la depresión del punto de rocío (numerador) y la humedad relativa. El coeficiente 1.609 se emplea para hacer la conversión de millas a kilómetros.

(Benjamin, 1999) RUC (Rapid Update Cycle)

$$Vis_{RUC} = 60 * e^{-2.5 * qrh} \quad (5)$$

donde

$$qrh = \min\left(0.8, \frac{rh_{max}}{100} - 0.15\right) \quad (5.1)$$

Este algoritmo empleado en el modelo RUC, plantea que la visibilidad puede ser obtenida mediante un modelo de regresión exponencial basado en la humedad relativa, siendo rh_{max} el mayor valor de humedad relativa entre los dos niveles del modelo más próximos a la superficie.

De conjunto con los algoritmos aquí descritos, también son empleadas distintas combinaciones de ellos, las cuales son objeto de evaluación en la investigación.

La primera combinación está basada en las expresiones correspondientes a SW99 y Vis_{FSL} , denominado Cvis (Combined visibility), (Bang et al., 2009; Lin et al., 2017), el mismo se basa en calcular ambos algoritmos

y escoger el valor mínimo entre ellos. La otra combinación es la que se realiza entre los algoritmos UPP1 y Vis_{RUC} , denominado GSD, también disponible en el UPP en su versión 2.2. En este caso, igual que en el anterior, se emplea el valor mínimo entre ambas expresiones, pero agrega un factor de inhibición basado en la cizalladura del viento (shear) en niveles bajos, el cual se aplica siempre que el GSD resultante estime valores menores o iguales a 9 km (Benjamin S. 1999; Lin et al., 2017). Considera para su cálculo los primeros tres niveles verticales del modelo.

$$\text{factor} = \min\left(1, \max\left(0, \frac{\text{shear} - 4}{2}\right)\right) \quad (6)$$

En la presente investigación se decide introducir una modificación al algoritmo Cvis. Dicha modificación fue motivada por el hecho de que varios autores reflejan que los resultados del algoritmo suelen estar acompañados de un importante volumen de falsas alarmas (Doran et al., 1999; Bang et al., 2009; Lin et al., 2017). El crecimiento de las falsas alarmas repercute en una tendencia a pronosticar apariciones tempranas y/o eventos más intensos y de mayor duración en relación con la realidad.

Se tiene en cuenta además que la cizalladura del viento en los niveles próximos a la superficie puede desempeñar un papel significativo en la aparición o no del fenómeno de niebla/neblina (de Paula et al., 2015). Esto responde a que ambientes con cizalladura moderada a fuerte favorecen la intrusión de aire seco de niveles superiores, así como una disminución de la humedad relativa, lo cual conduce a condiciones hostiles para el desarrollo o aparición del fenómeno; en cambio en situaciones de débil cizalladura y suficiente contenido de humedad en niveles próximos a la superficie, se produce la sobresaturación necesaria para la aparición de eventos de niebla/neblina.

Este análisis motivó la inclusión del factor de inhibición basado en la cizalladura del viento en niveles bajos también a Cvis. Dicho factor fue obtenido a partir de las consideraciones hechas por (Benjamin, 1999) reflejadas en el programa CALVIS_GSD.f del código fuente del UPP 2.2 y que, como se explicara anteriormente, está incluido en el algoritmo GSD (ecuación 6).

Dado que otros autores plantean la tendencia a la sobreestimación del fenómeno por parte de Cvis, dicho factor se aplicará al algoritmo solo cuando los valores de visibilidad horizontal que estime sean menores o iguales a 5 km. Se decide denominar esta modificación como Cvis+1 para su evaluación posterior a lo largo del artículo.

2.5 Verificación del pronóstico

Para evaluar los resultados del pronóstico se empleó una estrategia de verificación celda-punto sobre

el área de estudio, es válido aclarar que dicha evaluación se efectuó solamente sobre el dominio de mayor resolución, pues la resolución de los otros dos puede resultar muy pobre para reflejar adecuadamente las características de los fenómenos de niebla/neblina.

Esto permitió obtener los valores de error medio (ME, con sus siglas en inglés) para las variables viento, depresión del punto de rocío y humedad relativa, cuyos datos reales son obtenidos a partir de las mediciones registradas en las estaciones meteorológicas.

$$ME = \frac{1}{N} \sum (O - P) \quad (7)$$

Donde O representa la observación, P el pronóstico y N el total de datos a comparar.

La estimación de la visibilidad horizontal en las estaciones convencionales se realiza de forma visual mediante distancias conocidas desde el punto de la observación hasta determinados objetos de referencia. Se emplea por tanto una tabla de contingencia para evaluar la efectividad de los pronósticos de los algoritmos apoyándose en el dato asentado en el código de tiempo presente de las estaciones convencionales (tabla 2).

Como la comparación es en relación al dato de tiempo presente es importante aclarar que, para esta investigación, se consideraron aciertos cuando el algoritmo predijo valores inferiores a 5 km y el código de tiempo presente registró valores de 10 (neblina) o comprendidos entre 40 y 49 (niebla); fallos cuando el algoritmo pronosticó valores mayores o iguales a 5 km mientras que en el tiempo presente se registraron valores relativos a la presencia de nieblas/neblinas; falsas alarmas cuando el tiempo presente registró valores no relativos a nieblas/neblinas y simultáneamente el algoritmo predijo valores inferiores a 5 km; finalmente los correctos negativos consideraron valores de tiempo presente no relacionados con nieblas/neblinas y pronósticos del algoritmo superiores o iguales a 5 km.

Este análisis se realizó individualmente para cada una de las estaciones del área de estudio en cada reporte, que se realiza cada tres horas, y para cada algoritmo. Esto permitió la obtención de estadígrafos que caracterizaran el desempeño de cada uno de los algoritmos sujetos a investigación (ecuación 8). Los estadígrafos calculados incluyen la probabilidad de detección correcta (POD) y la probabilidad de falsa detección (POFD). Para obtener una idea más global del desempeño del algoritmo fueron utilizados, como valor resumen, el índice de detección crítica (CSI), que da una relación entre los aciertos, fallos y falsas alarmas.

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad POFD = \frac{b}{b+d} \quad CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (8)$$

Para todos los experimentos se evaluó la habilidad del pronóstico en dos secciones, considerando sola-

Tabla 2. Tabla de contingencia.

Pronosticado	Observado	
	Si	No
Si	a	b
No	c	d

mente las primeras 12 horas para fines de pronóstico inmediato y teniendo en cuenta el plazo total de pronóstico que genera SisPI (36 horas). Esto permite tener una idea de como reaccionan los algoritmos teniendo en cuenta el pronóstico a corto plazo y, por tanto, considerar la influencia o no del proceso de autoajuste del modelo.

2.6 Breve descripción del caso de estudio

El día 3 de enero de 2019 un frente frío estaba saliendo del continente hacia la porción occidental del golfo de México. La zona de estudio se halla bajo la débil influencia del anticiclón subtropical, el cual, desde el amanecer del día 3 impuso un flujo débil del segundo cuadrante (región sudeste) sobre el occidente de la isla. Esto generó que algunas estaciones reportaran neblina ese día, a excepción de las estaciones 78340 y 78374, ambas ubicadas hacia el interior de la región de estudio, las cuales reportaron niebla.

Durante el día 3 el frente frío continuó su avance sobre el golfo de México, persistiendo el patrón sinóptico descrito anteriormente (figura 2). La influencia anticiclónica sobre el área de estudio está caracterizada entonces por la presencia de débiles gradientes béricos, lo que trae como consecuencia un régimen de vientos en superficie muy débiles. Ya en la noche y madrugada, las condiciones de estabilidad favorecen la irradiación nocturna en presencia de vientos prácticamente en calma, con valores de humedad relativa por encima del 90% en todas las estaciones, algo característico de esta configuración sinóptica. El enfriamiento superficial acompañado de vientos débiles y un alto contenido de humedad conduce a las condiciones de saturación necesarias para la aparición de episodios de niebla/neblina (Alfonso & Florido, 1993; Álvarez *et al.*, 2011; Ryerson (2012); de Paula *et al.*, 2015;).

En resumen el día 4 de enero se produjo un evento de niebla/neblina sobre la región de estudio, que se prolongó hasta las 12:00 UTC aproximadamente.

El fenómeno objeto de estudio comenzó a manifestarse en la noche del día 4 desde las 00:00 UTC, con reportes de neblina en las estaciones 78320 y 78322, ambas localizadas al sudeste del área de estudio. La neblina fue propagándose progresivamente y a las 03:00 UTC ya 4 estaciones reportaban este fenómeno. Hacia las 06:00 UTC un total de 6 estaciones meteorológicas estaban reportando neblina, mientras que la 78340, 78373 y 78376 reportaban niebla comenzando en el transcurso de la hora precedente, con visibilidades estimadas en el entorno de 500 metros.

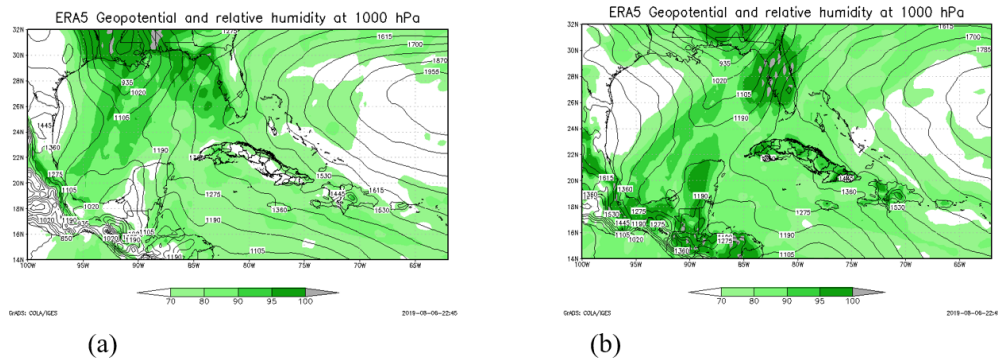


Figura 2. Mapas de geopotencial y humedad relativa en 1000mb obtenidos a partir del reanálisis del ERA5 correspondiente al día 4 de enero de 2019. (a) 00:00 UTC. (b) 12:00 UTC.

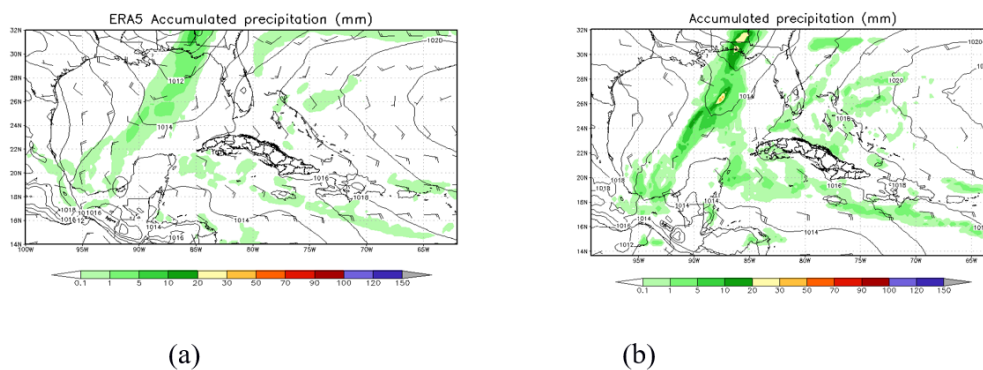


Figura 3. Campos de presión, viento y precipitación acumulada en las últimas 6 horas a las 12:00 UTC. (a) Reanálisis del ERA5; (b) Dominio de 27 km de SisPI inicializado a las 00:00 UTC.

El horario de las 09:00 UTC marcó el instante de mayor intensidad del fenómeno de acuerdo con los registros de tiempo presente. Un total de 6 estaciones reportaban visibilidades menores o iguales a 300 metros, siendo la región interior del área de estudio la más afectada, mientras que otras 4 reportaban neblina. A las 12:00 UTC comenzó a experimentarse un gradual debilitamiento del fenómeno, 6 estaciones reportaban neblina, al tiempo que las otras 4, todas en la porción interior, continuaban reportando niebla con visibilidades estimadas entre 200 y 700 metros.

El fenómeno fue más débil hacia la costa norte, donde solo se reportó neblina y más fuerte hacia la región interior, una característica descrita por varios autores cubanos, quienes plantean que estos fenómenos suelen ser más débiles hacia las costas, aparentemente debido al efecto modulador del mar que reduce la tasa de enfriamiento radiativo (Alfonso & Florido, 1993; Álvarez *et al.*, 2011; Acosta, 2012). Ya para la observación de las 15:00 UTC el fenómeno se había disipado por completo.

Al finalizar el día 4 el frente se localizaba sobre el sector oriental del golfo de México, muy próximo al occidente de la isla y con muy lento movimiento. Finalmente la entrada de la zona frontal al área de estudio se produciría alrededor de las 18:00 UTC del día 5, lo cual generó presencia de neblina principalmente hacia la región interior de Mayabeque entre las 09:00

y 12:00 UTC. Una causa probable de que el fenómeno se viera notablemente limitado el día 5 en relación al día anterior es el hecho de que el anticiclón migratorio en la altura se adelantó a la zona frontal, con la consecuente invasión de los oestes que trajeron consigo la intrusión de aire más seco, lo cual limitó la aparición y fortaleza del fenómeno en relación a los sucesos de la noche-madrugada del día 4.

3. RESULTADOS

3.1 Pronóstico del ambiente sinóptico a partir de la inicialización de las 00:00 UTC.

Los sistemas sinópticos fueron adecuadamente pronosticados por SisPI (figura 3). Sin embargo se puede observar una sobreestimación de la convección a lo largo de la banda frontal, lo cual sugiere un frente frío mejor definido de lo que estaba en la realidad.

También se observa que los gradientes de presión pronosticados son ligeramente más fuertes, lo cual se traduce en una sobreestimación de la fuerza del régimen de vientos imperante (figura 7). Dicha sobreestimación del viento se comportó entre 2 y 10 km/h, siendo mayor hacia zonas de la costa norte. En sentido general SisPI reflejó poca habilidad para pronosticar áreas de calma.

Estos valores de sobreestimación, si bien pueden no ser significativos para determinados fenómenos

(ciclones tropicales por ejemplo), en el caso de las nieblas/neblinas puede ser determinante. Es conocido que las bajas velocidades del viento disminuyen los procesos de mezcla por turbulencia, lo cual favorece el incremento de la humedad relativa junto a la superficie permitiendo el proceso de sobresaturación.

En relación al pronóstico de humedad relativa los errores medios sobre el área de estudio con esta inicialización fueron relativamente bajos, apreciándose como promedio una ligera subestimación en el entorno del 5%. Esta dificultad para reproducir las condiciones de saturación también han sido descritas por otros autores como (de Paula *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2020). Algo muy similar se obtuvo con los pronósticos de depresión del punto de rocío (figura 4b), muy ligados al comportamiento de la humedad relativa, donde se produjo una sobreestimación entre 0.3 y 1.19°C, aunque cabe recalcar que la mayor diferencia se obtuvo en el momento de la inicialización, aproximándose a la cota inferior del error en la medida que avanzaba el pronóstico.

El comportamiento descrito arriba constituye un indicio de que el modelo no reproduce adecuadamente las características mesoescalares donde debería aparecer la niebla/neblina a lo largo del área de estudio. El ejemplo de la (figura 5) ilustra este hecho. Aquí pueden apreciarse cortes verticales correspondientes a las estaciones 78320 y 78340, ambas localizadas en la porción interior del área de estudio.

El corte correspondiente a la estación 78320 muestra un régimen de vientos muy débil en la capa correspondiente a los primeros 500 metros y muy baja cizalladura del viento, lo cual sugiere condiciones favorables para la pérdida de calor y limitantes para la mezcla turbulenta desde los niveles inferiores. Por otro lado la tasa de enfriamiento comienza a disminuir en el entorno de las 09:00 UTC, esta disminución de la velocidad del enfriamiento radiativo es consistente con la etapa de formación de la niebla/neblina, donde esta es lo suficientemente profunda como para comenzar a absorber y reemitir la radiación proveniente del suelo.

El pronóstico sugiere además una inversión térmica bien establecida posterior a las 09:00 UTC, la

cual permanece casi invariable hasta el entorno de las 12:00 UTC, sugiriendo una limitación en relación a la pérdida de calor, consistente con la etapa de persistencia de la niebla/neblina, pues en este caso la radiación escapa generalmente en menor medida de la superficie y de la porción inferior de la capa de niebla, la niebla cubre los niveles inferiores, limitando la pérdida de calor por radiación. Sin embargo de esta descripción puede apreciarse que el modelo está sugiriendo condiciones que conducen a la aparición de un proceso de niebla/neblina pasadas las 06:00 UTC, unas 6 horas más tarde en relación con la realidad.

Por otro lado en el corte correspondiente a la estación 78340 (figura 5b) se aprecian algunas características similares a las observadas en la 78320, como el instante de tiempo donde aparece la disminución de la tasa de enfriamiento radiativo. Sin embargo presenta pequeñas diferencias que influyen negativamente en el pronóstico del ambiente sobre esta estación. Una de estas características es el incremento en la fuerza del viento pronosticada en el entorno de las 09:00 UTC. Este cambio en la fuerza del viento trajo consigo un debilitamiento del gradiente de la capa de inversión, posiblemente relacionado con la mezcla turbulenta asociada a la sobreestimación de la velocidad del viento.

Posterior a las 09:00 UTC, el pronóstico vuelve a debilitar los vientos y se produce un proceso corto de enfriamiento radiativo y fortalecimiento de la inversión, pero no lo suficientemente fuerte/rápido como para establecer condiciones favorables para la persistencia del fenómeno. De hecho, los pronósticos de los distintos algoritmos fallaron en cuanto a persistencia e intensidad sobre esta estación, siendo mucho más consecuentes en la estación 78320.

Este comportamiento descrito anteriormente se repite de forma aleatoria sobre la región de estudio. Se observa cierta tendencia de SisPI, desde el punto de vista del pronóstico a corto plazo, a pronosticar apariciones tardías y, por ende, episodios de más corta duración. Una causa probable de este resultado es el autoajuste de los campos de masa y momentum requerido para lograr establecer las condiciones óptimas para el desarrollo de la niebla de radiación. Este supuesto ha

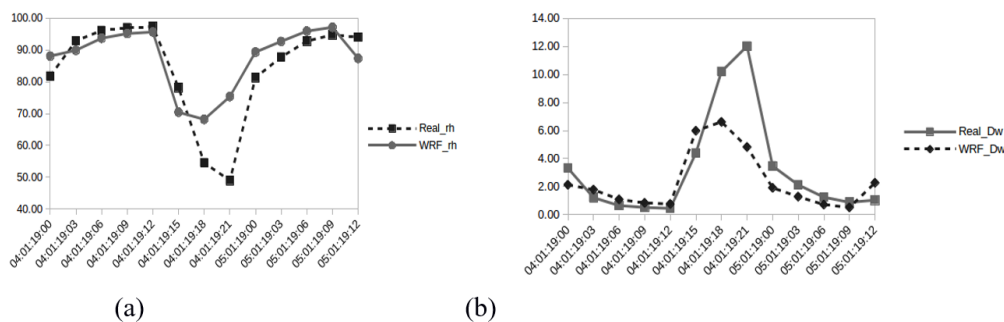


Figura 4. Comportamiento medio sobre el área de estudio de los pronósticos de humedad relativa (%) y depresión del punto de rocío (°C) en la inicialización correspondiente a las 00:00 UTC.

sido descrito por autores foráneos (Román-Cascón, 2015; Lin *et al.*, 2017). En el caso específico de (Román-Cascón, 2015) donde se estudian tres casos de niebla de radiación, los resultados sugieren que son necesarias hasta 30 horas de autoajuste para lograr una predicción adecuada sin embargo, desde el punto de vista tecnológico y operativo, puede generar dificultades adicionales.

3.2 Pronóstico del ambiente sinóptico a partir de la inicialización de las 06:00 UTC.

El pronóstico del ambiente sinóptico en este horario estuvo caracterizado por un fortalecimiento del anticiclón subtropical de conjunto con una ligera expansión de su cuña más hacia el oeste, esta característica se observa hasta los niveles medios (figura 6).

Esta característica se asocia a sobreestimaciones en la fuerza del viento sobre el área de estudio, pero que resultaron ligeramente inferiores a las obtenidas en la inicialización de las 00:00 UTC (figura 7).

Teniendo en cuenta estos resultados podría inferirse que si se obtienen pronósticos más certeros en relación a la humedad relativa, la temperatura y el punto de rocío el pronóstico del fenómeno niebla/neblina podría ser superior con esta inicialización, pero los resultados

fueron conducentes a un ambiente más hostil para su desenvolvimiento. Los pronósticos de humedad relativa generaron una marcada subestimación, con estimaciones inferiores a la cota mínima necesaria para la aparición de la niebla/neblina en el área de estudio (90%). Estos resultados son inferiores a los obtenidos con la inicialización de las 00:00 UTC y deben conducir a un retraso o la no aparición de la sobresaturación necesaria para la aparición de la niebla/neblina.

Como cabe esperar, los pronósticos de depresión del punto de rocío son sobreestimados entre 0.7 y 1.6°C aproximadamente (figura 8). El resultado de esto está relacionado con la presencia de un ambiente más cálido previsto por esta inicialización en relación a los resultados obtenidos el las 00:00 UTC, particularmente durante las primeras horas de pronóstico. Al tener una masa de aire con la temperatura más elevada esta puede soportar un mayor volumen de humedad, lo cual limita la sobresaturación que se requiere para la formación de procesos de niebla/neblina. Estos resultados repercutieron en los valores de visibilidad calculados por los diferentes algoritmos.

Las diferencias en los pronósticos generados para ambas inicializaciones también pueden observarse en la vertical (figura 9).

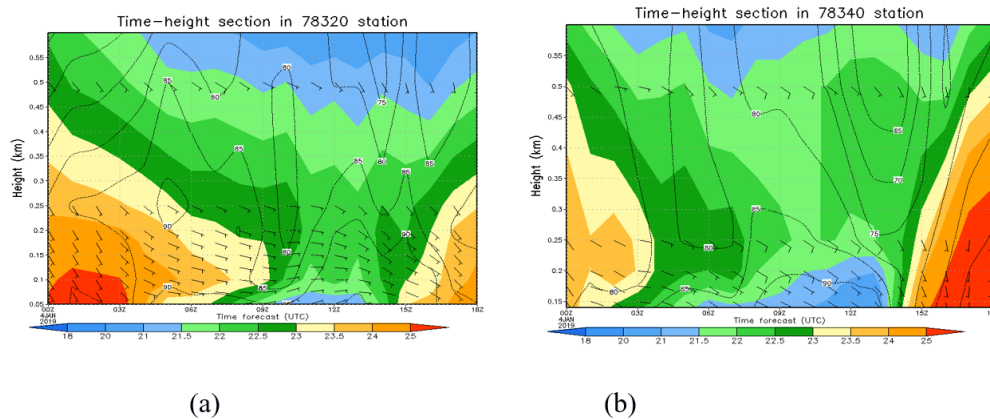


Figura 5. Cortes verticales de los primeros 600 metros sobre las estaciones 78320 (a) y 78340 (b) que incluyen viento (km/h); humedad relativa (%), y temperatura (°C-sombreado). Pronósticos inicializados a las 00:00 UTC válidos hasta las 18:00 UTC.

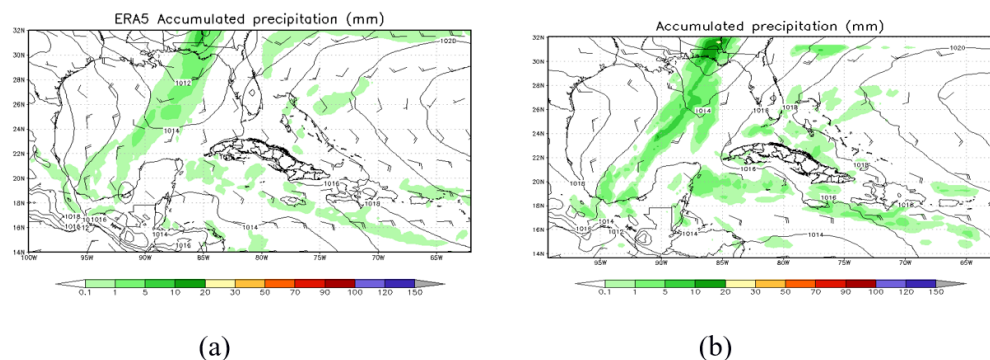


Figura 6. Campos de presión, viento y precipitación acumulada en las últimas 6 horas a las 12:00 UTC. (a) Reanálisis del ERA5; (b) Dominio de 27 km de SisPI inicializado a las 06:00 UTC.

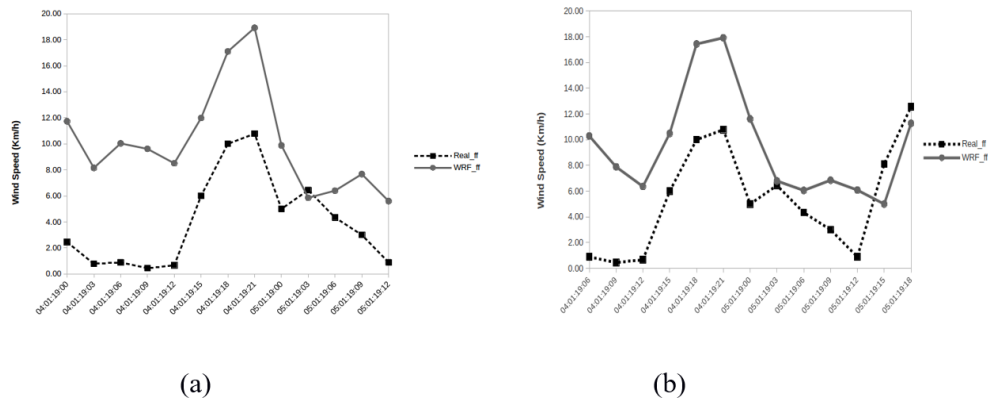


Figura 7. Relación entre la fuerza del viento media y pronosticada sobre el área de estudio (km/h). (a) inicializado 00:00 UTC; (b) inicializado 06:00 UTC.

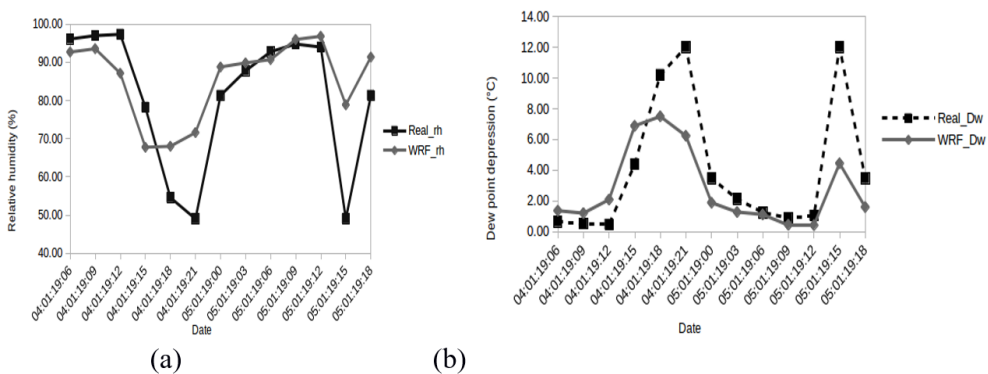


Figura 8. Comportamiento medio sobre el área de estudio de los pronósticos de humedad relativa (%) y depresión del punto de rocío (°C) en la inicialización correspondiente a las 06:00 UTC.

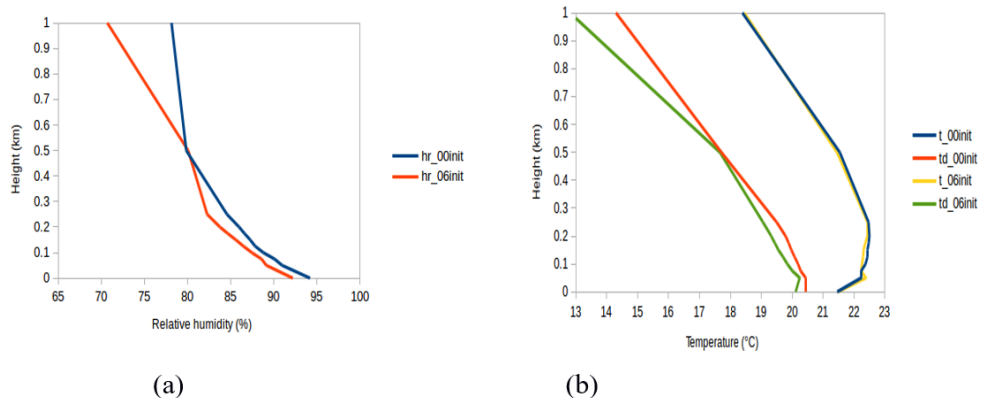


Figura 9. Pronósticos medios de humedad relativa, temperatura y punto de rocío sobre el primer kilómetro de altura para ambas inicializaciones, correspondiente al día 4 a las 09:00 UTC en el momento de máxima intensidad del fenómeno. (a) Humedad relativa; (b) Temperatura y punto de rocío.

En resumen la inicialización de las 06:00 UTC predijo un ambiente más seco, con valores que podrían limitar la aparición del fenómeno en mayores porciones del área de estudio. El comportamiento de los perfiles de temperatura y temperatura del punto de rocío coincide con este hecho, donde además se observa como la inicialización correspondiente a las 00:00 UTC pronostica una inversión térmica más fuerte y profunda desde el horario de las 09:00 UTC.

Sin embargo en la inicialización de las 00:00 UTC se observa una erosión de la inversión más marcada en el pronóstico para las 12:00 UTC del día 4 de enero, en contraposición a la inicialización de las 06:00 UTC. Esta condición está asociada a la sobreestimación de la fuerza del viento, la cual resultó más marcada en la inicialización de las 00:00 UTC (figura 6).

3.3 Pronóstico de los algoritmos de visibilidad

En sentido general los algoritmos asociados exclusivamente a la concentración de hidrometeoros muestran un pobre desempeño desde el punto de vista del pronóstico de niebla/neblina sobre el área de estudio para ambas inicializaciones. Su comportamiento está caracterizado por un incremento sustancial en el número de fallos con respecto al resto, dado que pronostican valores constantes de 20-25 km. Este resultado está directamente relacionado al pronóstico de contenido de agua líquida igual a cero en grandes porciones del área de estudio, siendo estos algoritmos muy sensibles a esta variable. Resultados similares obtuvieron (Ryerson, 2012), donde se reveló baja habilidad del WRF para pronosticar esa variable (figura 10).

La probabilidad de detección correcta durante las primeras 12 horas de pronóstico es nula por completo, y no rebasa el 10% al analizar las 36 horas de pronóstico. Algo muy similar ocurre con el algoritmo propuesto por la AFWA, el cual tampoco da muestras de habilidad de pronóstico sobre el área de estudio. En el caso particular del algoritmo AFWA, los resultados obtenidos coinciden con (Lin *et al.*, 2017), donde su desempeño resultó muy pobre.

En relación con los algoritmos que consideran la humedad relativa el algoritmo RUC mostró un pésimo desempeño, fallando en todos los horarios de presencia del evento durante ambas inicializaciones, como resultado de pronosticar siempre valores superiores a

5km. Una consecuencia de ello puede estar relacionada con el hecho de que la relación propuesta por el algoritmo no se adecúa a las características del área de estudio (figura 11).

Por otro lado FSL mostró mayor habilidad. En la inicialización de las 00:00 UTC durante las primeras 12 horas de pronóstico el número de fallos se incrementa debido a que no pronosticó el fenómeno en los plazos correspondientes a las 00:00 y 03:00 UTC, este retraso en la formación conduce a un período de duración del evento más corto, en correspondencia con las características del ambiente pronosticado por el modelo descritas arriba. Esto dió al traste con que el CSI no pasara del 38% para estas primeras 12 horas, con un POD de 41%. Al analizar el plazo completo (36 horas de pronóstico) su desempeño mejora, con un POD de 81% y un CSI de 62%, lo cual sugiere que las mayores incertidumbres de los pronósticos con este algoritmo están en las primeras horas de pronóstico. Esto corrobora la influencia del proceso de autoajuste sobre los pronósticos a corto plazo.

Un comportamiento similar se obtiene con la inicialización de las 06:00 UTC. Sus pronósticos durante las primeras 12 horas de pronóstico estuvieron caracterizados por la no detección del fenómeno en el primer plazo y una rápida disipación del mismo en algunos puntos, lo que dejó valores de CSI en el entorno del 25%, inferiores a la inicialización anterior. En este sentido se observa una tendencia a pronosticar un retraso en la aparición del fenómeno. Al analizar el

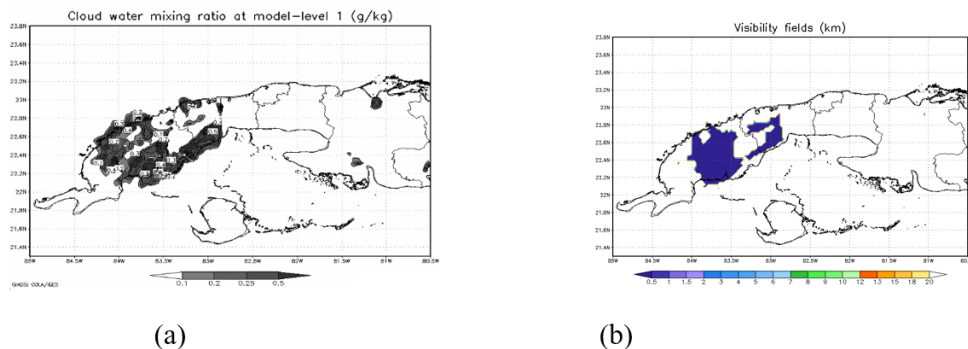


Figura 10. Comparación del pronóstico del contenido de agua líquida (a) con el resultado del algoritmo SW99 (b) correspondientes a las 12:00 UTC del 4 de enero del 2019 inicializando SisPI a las 00:00 UTC.

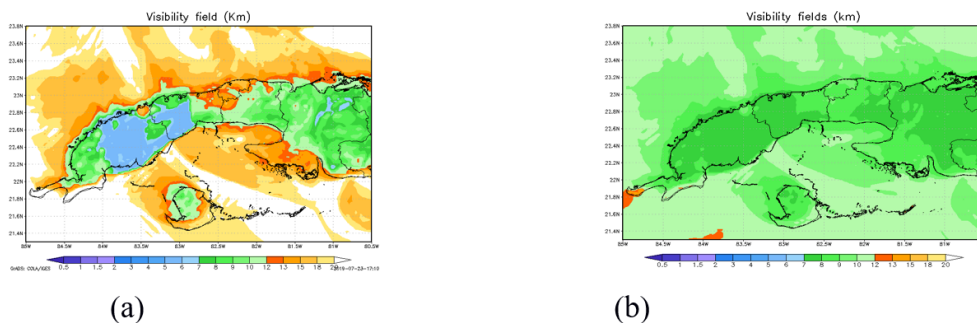


Figura 11. Pronóstico de los algoritmos; AFWA (a); RUC (b) para el día 4 de enero a las 09:00 UTC correspondientes a la inicialización de las 00:00 UTC.

período de pronóstico completo, se aprecia que para las siguientes 24 horas este mejora sustancialmente, pero las dificultades para pronosticar el evento en el corto plazo dieron al traste con índices de detección del orden del 45%, más bajos que en el caso de las 00:00 UTC.

En relación a los algoritmos combinados Cvis mostró valores idénticos a los propuestos por FSL pues dado que SW99 predijo valores constantes no produjo ninguna influencia sobre Cvis.

GSD mostró una respuesta muy similar para ambas inicializaciones con valores de detección correcta entre 30 y 40% tanto para las primeras 12 horas de pronóstico como para el plazo de 36 horas, pronosticando eventos de efímera duración. El incremento de los valores de visibilidad pronosticados por GSD coincide con las mayores sobreestimaciones de la fuerza del viento que provocaron un número de fallos ligeramente mayor que en el caso de FSL. Esto sugiere cierta sensibilidad del algoritmo a esta variable. Es válido señalar que en los instantes que pronosticó la aparición de niebla/neblina fue el que mejor reflejó la intensidad del fenómeno en relación al resto de los algoritmos (figura 12). Estos resultados contrastan

con (Lin *et al.*, 2017), quienes obtuvieron los mejores resultados para su área de estudio con este algoritmo.

El algoritmo propuesto Cvis+1 fue el de mejor desempeño en cuanto a la detección del fenómeno durante las primeras 12 horas de pronóstico, ya que se logró una ligera reducción de los fallos en beneficio de las detecciones correctas (52%), lo cual permitió alcanzar valores de CSI en el entorno del 48% durante las primeras 12 horas de pronóstico que, como se ha podido apreciar resultan las más críticas, para el experimento inicializado a las 00:00 UTC. Los valores de este índice, en estas primeras horas de pronóstico, fueron ligeramente inferior para la inicialización de las 06:00 UTC (42%). Esto fue resultado de una detección más temprana del fenómeno en relación con Cvis (figura 13).

Para la totalidad del plazo sus pronósticos fueron equivalentes a los obtenidos por FSL, pero la mejora alcanzada al inicio permite el POD y CSI más altos con 86% y 65% respectivamente para la inicialización de las 00:00 UTC y de 67% y 50% respectivamente para el experimento de las 06:00 UTC.

En la tabla 3 descrita a continuación quedan resumidos estos resultados.

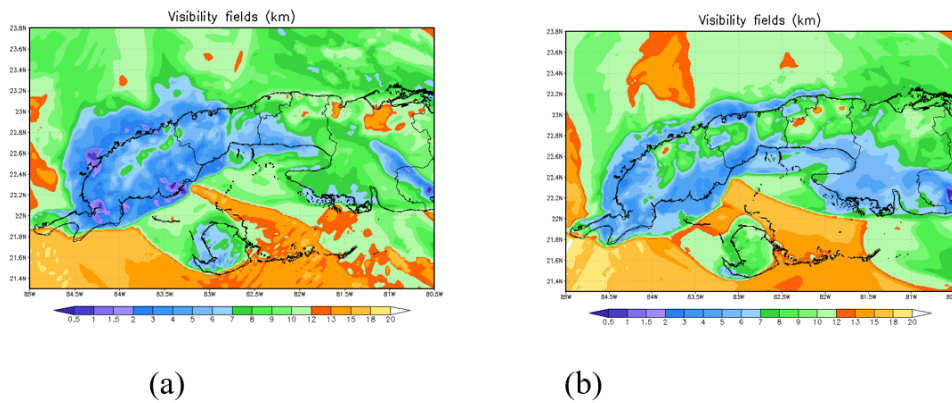


Figura 12. Pronóstico del algoritmo GSD para el día 4 a las 12:00 UTC; (a) inicializado a las 00:00 UTC; (b) inicializado a las 06:00 UTC.

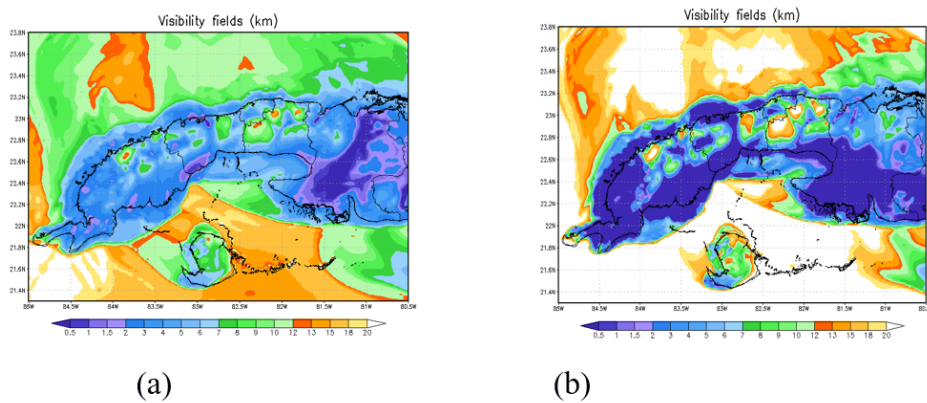


Figura 13. Pronóstico correspondiente a las 12:00 UTC del día 4 con el experimento inicializado a las 06:00 UTC donde se pueden observar las diferencias entre los algoritmos FSL-Cvis (a) y Cvis+1 (b).

Tabla 3. Comportamiento del CSI (%) de los diferentes algoritmos para ambas inicializaciones sobre el área de estudio. Considerando solo las primeras 12 horas de pronóstico y el período completo de pronóstico de SisPI de 36 horas.

Algoritmos	Inicialización 00:00 UTC		Inicialización 06:00 UTC	
	12 horas iniciales	36 horas	12 horas iniciales	36 horas
SW99	0	10	0	13
FSL	38	62	25	45
Cvis	38	62	25	45
Cvis+1	48	65	40	50
AFWA	0	15	0	19
RUC	0	0	0	0
UPP	0	10	0	13
GSD	30	40	21	31

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó el pronóstico numérico de un evento de niebla/neblina acaecido en la noche-madrugada del día 4 de enero de 2019. Los pronósticos de SisPI estuvieron caracterizados por una sobreestimación de la fuerza del viento, la cual fue más acentuada en el experimento inicializado a las 00:00 UTC. También muestran una tendencia a la subestimación de la humedad relativa sobre el área de estudio, la cual fue significativa en el experimento correspondiente a las 06:00 UTC. Siguiendo la lógica de estos resultados las diferencias entre la temperatura ambiente y el punto de rocío fueron sobreestimadas en ambos casos, particularmente en el experimento inicializado a las 06:00 UTC.

Los algoritmos relacionados con la concentración de diferentes especies de hidrometeoros muestran una habilidad de pronóstico prácticamente nula sobre el área de estudio. Algo similar ocurre con los algoritmos AFWA y RUC, de los cuales se presume que la relación empírica propuesta no es aplicable al área de estudio, aunque no pueden descartarse otros factores que pudieran influir asociados a las configuraciones físicas empleadas por SisPI en estos experimentos.

El algoritmo GSD muestra un mejor comportamiento con valores de CSI en el entorno del 30% y fue el que mejor logró caracterizar la intensidad del fenómeno, pero sus pronósticos se ven muy afectados por la sobreestimación del viento sobre el área de estudio.

Los algoritmos relacionados con la depresión del punto de rocío resultaron los de mayor habilidad sobre el área de estudio, con valores de CSI en el entorno del 62% y 45% para los experimentos inicializados a las 00:00 y 06:00 UTC respectivamente. La inclusión del coeficiente de inhibición del viento con el algoritmo Cvis+1 condujo a resultados ligeramente mejores aunque desde el punto de vista del pronóstico de intensidad no se lograron mejoras significativas.

En sentido general durante las primeras 6 horas de pronóstico el modelo es ineficiente en pronosticar condiciones conducentes a la aparición/desarrollo de eventos de niebla/neblina, algo que puede estar estre-

chamente relacionado con el proceso de autoajuste de los campos de masa y momentum o con condiciones iniciales deficientes. Por otro lado el pronóstico del horario de disipación fue correcto, aunque el incremento de la sobreestimación del viento a las 12:00 UTC fue un elemento condicionante para el pronóstico de disipaciones tempranas. Se observa una tendencia a predecir eventos de niebla/neblina de menor extensión temporal en ambas inicializaciones.

REFERENCIAS

- Acosta G. (2011): Caracterización de las nieblas para cinco estaciones del occidente de Cuba en el período 2000-2009. Tesina del Diplomado de Física de la Atmósfera, UDICT, Instituto de Meteorología.
- Alfonso A. P. (1980): Descripción preliminar de las condiciones meteorológicas en la Isla de la Juventud. Informe Científico - Técnico. Instituto de Meteorología No. 134, 25 pp.
- Alfonso A. P.; A. Florido (1993): El clima de Matanzas. Editorial Academia, La Habana, 113 pp.
- Álvarez, E. L.; Borrajero, M. I.; Álvarez, M. R. & León, L. A. (2011^a). “Estudio de la marcha interanual de la frecuencia de ocurrencia de los fenómenos nieblas y neblinas a partir del código de estado de tiempo presente”. Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, (12): 31-46, ISSN: 1729-3790
- Bergot T.; D. Guedalia (1993): Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part I: Numerical Model and Sensitivity Tests. MWR, Vol. 122, No. 6, 1218-1230. DOI: [10.1175/1520-0493\(1994\)](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1218:NUMFOP>2.0.CO;2)
- Creighton G.; Kuchera E.; McCormick J.; Rentschler S.; Wickard B. (2014): AFWA Diagnostics in WRF. <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/>
- Gulpepe I.; Müller M. D.; Boybeyi Z. (2006): A new visibility parametrization for warm fog applications in Numerical Weather Prediction Models. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Volume 45.
- Gulpepe I. and Milbrandt J. A. (2009): Probabilistic parametrizations of visibility using observations of rain precipitations rate, relative humidity and

- visibility. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Volume 49.
DOI: [10.1175/2009JAMC1927.1](https://doi.org/10.1175/2009JAMC1927.1)
- de Paula, Norton Franciscatto; Scremin Puhales, Franciano; Anabor, Vagner; Dal Piva, Everson; de Lima Nascimento, Ernani (2015): Mean weather characteristics associated to radiation fog at Santa Maria-RS. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.37 n.3, 2015, Set.- Dez. p. 613 - 624 *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM* ISSN impressa: 0100-8307 ISSN on-line: 2179-460X.
DOI: [10.5902/2179-460X17277](https://doi.org/10.5902/2179-460X17277).
- Jansá Guardiola J. M. (1974): Curso de Climatología. Instituto Cubano del Libro, La Habana, 445 pp.
- Kunkel, B. A.: Parametrization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23, 34-41, 1984.
- Ledesma, M. & Baleriola, G. 2003. *Meteorología aplicada a la aviación*. 12th ed., Madrid: Thomson Paraninfo, 602 p. ISBN: 978-84-283-2840-1
- Maura L., Rojas Y., Carnesoltas M., Rubio C., Laborde N., Perigó E., Baza R. (2008): Comportamiento de la niebla en la provincia de Guantánamo
- Ryerson William R. (2012): Toward improving short-range fog prediction in data-denied areas using the Air Force Agency Mesoscale Ensemble.
<https://calhoun.nps.edu/handle/10945/17454>.
- Sierra et. al. (2014) Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos. Informe de resultado. Programa: "Meteorología y Desarrollo Sostenible del País". Instituto de Meteorología. DOI: [10.13140/RG.2.1.2888.1127](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2888.1127)
<https://modelos.insmet.cu/static/models/docs/>.
- Sosa M.; O. Rodríguez; R. Hernández (1992): Las nieblas en las Provincias Habaneras. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 5, No. 2, pp 28 34.
- Stoelinga, M. T., and T. T. Warner, 1999: Nonhydrostatic, Mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. *J. Appl. Meteor.*, 38, 385- 404.
- Wang et al (2013): Assimilating MTSAT-Derived Humidity in Nowcasting Sea Fog over the Yellow Sea. DOI: [10.1175/WAF-D-12-00123.1](https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00123.1)
- WMO (1992): Vocabulario Meteorológico Mundial (1992). OMM No. 182, 784 pp.

Lic. Pedro Manuel González Jardines. Jose Martí ,International Airport, Boyeros Ave, Havana, Cuba. E-mail: pedro.met90@gmail.com

Dra. Maibys Sierra Lorenzo. Center for Atmospheric Physics, Institute of Meteorology, Casablanca, Havana, Cuba. E-mail: maibys.lorenzo@insmet.cu

Msc. Carlos Manuel González. Ramírez. Provincial Meteorological Center La Habana-Artemisa-Mayabeque. Institute of Meteorology, Casablanca, Havana, Cuba. E-mail: carlosm.gonzalez@insmet.cu

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

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Pedro M. González Jardines. **Redacción-revisión y edición:** Pedro M. González Jardines, Maibys Sierra Lorenzo y Carlos M. González Ramírez. **Investigación:** Pedro M. González Jardines. **Conservación de datos:** Pedro M. González Jardines

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)