

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL SISTEMA NTHF PARA EL HURACÁN DORIAN (2019)

*Onel Rodríguez Navarro*¹, *Albenis Pérez Alarcón*², *Arlett Díaz Zurita*³, *José Carlos Fernández Alvarez*⁴

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Ave Salvador Allende # 1110 e/ Infanta y R. Boyeros, Plaza de La Revolución, La Habana, Cuba,
onrona97@gmail.com

²Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Ave Salvador Allende # 1110 e/ Infanta y R. Boyeros, Plaza de La Revolución, La Habana, Cuba,
albenisp@instec.cu

³Empresa Cubana de Navegación Aérea, Carretera Panamericana y Final, Boyeros, La Habana, Cuba,
adzurita378@gmail.com

⁴Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Ave Salvador Allende # 1110 e/ Infanta y R. Boyeros, Plaza de La Revolución, La Habana, Cuba,
jcfernandez@instec.cu

Resumen

Se realizaron las simulaciones, para un plazo de 120 horas, del huracán Dorian desde el 27 de agosto hasta el 7 de septiembre de 2019 usando el sistema de pronóstico numérico de ciclones tropicales NTHF (Numerical Tools for Hurricane Forecast) operativo en el Departamento de Meteorología del InSTEC (Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas). Las condiciones de frontera y las condiciones iniciales se tomaron de las salidas pronóstico del GFS (Global Forecast System) de las 0000 UTC y de los avisos de ciclón tropical emitidos por el NHC (National Hurricane Center). En la evaluación realizada el error de trayectoria osciló entre los 28 km para las primeras 6 horas de pronóstico y los 265 km para las 120 horas, siendo inferiores en todos los plazos de tiempo a los errores medios del sistema NTHF en el pronóstico de trayectoria en el período 2016-2018, y muy similares a los errores medios del pronóstico oficial del NHC en el período 2013 – 2017. En el caso de la intensidad, los errores para la presión mínima central oscilaron entre los 17 y 24 hPa siendo máximos en los primeros plazos de tiempo, mientras que en el pronóstico de la velocidad del viento los errores estuvieron entre los 59 y 75 km/h, observándose los máximos valores en las primeras horas de pronóstico. Este comportamiento se corresponde con los errores medios del sistema NTHF en el pronóstico de intensidad de huracanes.

Palabras claves: NTHF, ciclones tropicales, trayectoria, intensidad, pronóstico

Abstract

Simulations of hurricane Dorian were developed, for a time forecast of 120 hours, from August 27 to September 7, 2019 using the NTHF (Numerical Tools for Hurricane Forecast) numerical forecasting system in the Department of Meteorology of the InSTEC (Higher Institute of Technologies and Applied Sciences). The boundary and initials conditions were taken from the GFS (Global Forecast System) forecast outputs of the 0000 UTC and the tropical cyclone warnings issued by the NHC. In the evaluation carried out, the track error ranged between 28 km for the first 6 hours of forecast and 265 km for 120 hours, being inferior in all time periods to the average errors of the NTHF system in the track forecast in the 2016-2018 period, and very similar to the average errors of the official NHC forecast in the 2013-2017 period. In the case of intensity, the errors for the minimum central pressure ranged between 17 and 24 hPa being maximum in the first time periods, while in the wind speed forecast the errors were between 59 and 75 km/h, with the highest values observed in the first hours of forecast. This behavior corresponds to the average errors of the NTHF system in the hurricane intensity forecast.

Key words: NTHF, tropical cyclones, track, intensity, forecast

1. Introducción

El principal objetivo de la Meteorología a través del tiempo, ha sido indudablemente el estudio de los fenómenos meteorológicos que afectan las diferentes actividades humanas, lo cual ha motivado a la comunidad científica a buscar mecanismos que permitan el conocimiento anticipado de la evolución de los procesos atmosféricos, mediante el desarrollo de modelos de pronóstico del tiempo.

Uno de los fenómenos meteorológicos que más daños ocasiona es el ciclón tropical. Debido a su amplia zona de actividad son muchos los países que conocen sus efectos y las grandes pérdidas, tanto de vidas humanas como materiales, que ellos ocasionan; siendo las zonas más propensas a las afectaciones las áreas costeras como consecuencia de los fuertes vientos superficiales y las inundaciones ocasionadas por las intensas lluvias y la marea de tormenta (Lighthill, 1998). A pesar de su poder destructivo los huracanes también ayudan a mantener el balance global de energía, desplazando calor y aire húmedo tropical a las latitudes medias y regiones polares.

Los principales modelos de pronóstico de trayectoria de huracanes que se corren operacionalmente para la cuenca del Atlántico Norte van desde el modelo básico que se usa como un pronóstico “sin habilidad” para comparar otros modelos contra él, CLIPER (Climatology and Persistence), hasta modelos como el HWRF (Hurricane Weather Research and Forecasting Model) que es de los más sofisticados modelos dinámicos utilizados en la actualidad. A pesar de la variedad de modelos de pronóstico para la trayectoria de huracanes, son menos la cantidad que pronostican el cambio de intensidad para esta región, tales son los casos del SHIFOR (modelo Estadístico del Pronóstico de la Intensidad del Huracán) y el SHIPS (Esquema Estadístico de la Predicción de la Intensidad de Huracanes).

En la cuenca del Atlántico Norte, el centro regional para el pronóstico de los ciclones tropicales es el NHC (National Hurricane Center), donde todos los pronósticos oficiales se verifican comparándolos con la “trayectoria mejorada”, una serie de posiciones del centro de cada seis horas y valores máximos de la velocidad del viento, que representa el estimado oficial del NHC de la posición e intensidad del ciclón tropical; para cada ciclón tropical se prepara una trayectoria mejorada usando todos los datos disponibles. Actualmente los pronósticos de intensidad y trayectoria del NHC han mejorado mucho en las últimas décadas, debido a una combinación de los modelos numéricos más exactos, más observaciones sobre el océano y un entendimiento mejor de la física del movimiento del huracán.

La mayoría de las investigaciones dedicadas al pronóstico de intensidad y trayectoria de ciclones tropicales en Cuba se han orientado al desarrollo de modelos estadísticos basados en la persistencia climatológica. Actualmente, son las configuraciones obtenidas para el WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model-Advanced Research WRF) para condiciones medias de la atmósfera en el

SPNOA (Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera) y en el SisPI (Sistema de Predicción Inmediato) las que se utilizan para el pronóstico numérico de ciclones tropicales. Los dominios de cómputo de estos sistemas son estáticos por lo que no permiten el seguimiento del vórtice desde su formación. En evaluaciones realizadas a estos modelos, se han obtenido resultados aceptables en el pronóstico de trayectoria para las primeras 48 horas, sin embargo, se han obtenido resultados discretos para plazos superiores y para el pronóstico de intensidad.

Actualmente en el departamento de Meteorología del InSTEC se emplea de forma operativa durante la temporada ciclónica de la cuenca del Atlántico Norte el NTHF (Numerical Tools for Hurricane Forecast), que es una herramienta numérica desarrollada por Alarcón (2019) para el pronóstico de intensidad y trayectoria de ciclones tropicales, la misma permite el seguimiento del vórtice desde su formación. Por ello en el presente trabajo se plantea como **objetivo general**:

Evaluar el pronóstico numérico de intensidad y trayectoria realizado por el sistema NTHF para el huracán Dorian.

2. Materiales y Métodos

2.1. Sistema de pronóstico empleado

2.1.1. Numerical Tools for Hurricane Forecast (NTHF)

El sistema NTHF es una herramienta desarrollada por Alarcón (2019) para el pronóstico de trayectoria e intensidad de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico Norte. La misma se mantiene operativa desde junio del 2019 en el departamento de Meteorología del InSTEC durante la temporada ciclónica. Este sistema está basado en la configuración de la componente atmosférica HWRF con dos dominios de cómputo anidados de 27 y 9 km de resolución ¹, centrados durante el proceso de inicialización en el centro de la tormenta y con el dominio interno móvil (9 km) siguiendo el centro del vórtice durante el proceso de integración del modelo. La inicialización del modelo durante las corridas operativas se hace con información oficial del NHC y las salidas pronóstico del GFS.

2.1.2. Componente atmosférica del HWRF

El HWRF fue implementado en los NCEP(National Centers for Environmental Prediction) del Servicio Meteorológico Nacional (NWS) y está operativo desde el 2007. Es un modelo acoplado océano-atmósfera con ecuaciones primitivas no hidrostáticas destinado para la predicción de los pronóstico de trayectoria,

¹HWRF_27-9-m: HWRF con dos dominios de cómputo anidados de 27 y 9 km de resolución, con el de 9 km móvil.

intensidad y estructura de los ciclones tropicales. Incluye la infraestructura del WRF y está basado en el núcleo dinámico NMM. La inicialización del modelo se compone de un procedimiento de relocalización de vórtice y asimilación de datos y cuenta con un conjunto de parametrizaciones físicas desarrolladas para el pronóstico de ciclones tropicales. Usa datos de observaciones de satélite, de boyas y de aviones de reconocimientos. Para habilitar la opción del seguimiento del vórtice al compilar y correr el modelo se exporta HWRF=1 (Biswas and et al., 2017). En esta investigación solo se empleó la componente atmosférica del HWRF en su versión 3.9.

Las parametrizaciones utilizadas para la componente atmosférica del HWRF se pueden observar en la siguiente tabla:

Cuadro 1: Configuración utilizada en la componente atmosférica del HWRF

Sistema de ecuaciones	Ecuaciones Primitivas con opción no hidrostática
Resolución vertical	32 niveles verticales
Parametrización de radiación de onda larga	RRTMG scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Parametrización de radiación de onda corta	RRTMG scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Parametrización de cúmulos	Scale-Aware Simplified Arakawa-Schubert scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Parametrización de microfísica	Ferrier-Aligo scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Capa Fronteriza Atmosférica	GFS Hybrid-EDMF pbl scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Procesos de superficie subyacente	HWRF surface layer scheme (HWRF operativo en el NCEP)
Seguimiento de vórtice	GFDL vortex tracker (HWRF operativo en el NCEP)
Relocalización del vórtice	no
Coupling con modelo oceánico	no
SST update	no
Time step	69 segundos (27 km) y 23 segundos (9 km)

2.2. Huracán Dorian

La evaluación del pronóstico de trayectoria e intensidad realizado por el NTHF se realizó para el caso del huracán Dorian (figura 1), este fue el huracán más fuerte en afectar el noroeste de Bahamas jamás registrado, causando daños catastróficos en las islas Ábaco y Gran Bahama a principios de septiembre de 2019, el mismo fue el quinto ciclón tropical, la cuarta tormenta nombrada, el segundo huracán y el primer huracán mayor de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2019.

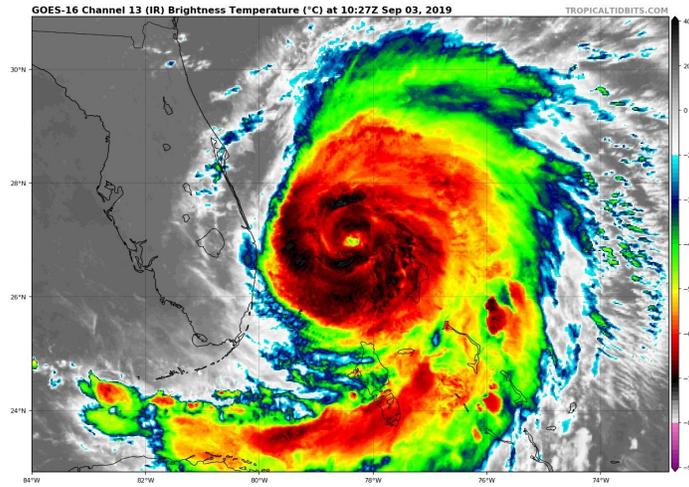


Figura 1: Imagen de satélite del huracán Dorian tomada por el GOES 16 canal 13 (infrarrojo) a las 10:27Z del 20190903.

El área en la que se trasladó Dorian durante su ciclo de vida fue la cuenca del Atlántico Norte (figura 2), la cual incluye el Océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México. La gran actividad ciclónica que ha ocurrido a lo largo de la historia en dicha zona ha centrado aún más la atención sobre la climatología de los ciclones tropicales, su variabilidad y sus tendencias a largo plazo. Además esta región por sus determinadas características como sus aguas cálidas, es una de las principales zona de formación de ciclones tropicales y en la misma los sistemas ciclónicos alcanzan su etapa de máximo desarrollo.

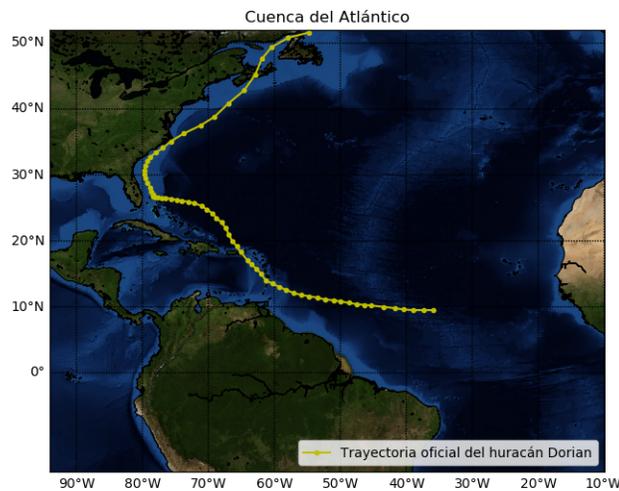


Figura 2: Cuenca del Atlántico y trayectoria del huracán Dorian.

2.2.1. Historia sinóptica del huracán Dorian

Dorian se originó el 23 de agosto a partir de una onda tropical que se encontraba a más de 1600 km al este de las Islas de Barlovento. La perturbación se organizó rápidamente y se convirtió en una depresión

tropical y más tarde en una tormenta tropical, ambas el 24 de agosto. La tormenta pasó sobre Barbados y entró al Mar Caribe el 26 de agosto a medida que se fortaleció gradualmente. Dorian tocó tierra en Santa Lucía al día siguiente, lo que causó graves interrupciones en la estructura del sistema. Inicialmente previsto para atacar a La Española, la trayectoria de Dorian se desplazó gradualmente hacia el este a medida que la tormenta se acercaba a las Antillas Mayores. Debido a la interacción de la tierra y el aire seco, el centro de Dorian se reformó al norte de su ubicación anterior, haciendo que la trayectoria del sistema se desplazara hacia el norte. Las cálidas temperaturas de la superficie del mar, la inestabilidad condicional a través de una capa profunda y los significativos valores de vorticidad en la tropósfera baja, permitieron a Dorian convertirse en un huracán de categoría 1 al pasar sobre Saint Thomas el 28 de agosto. La tormenta desarrolló un ojo en las imágenes de satélite poco después, pero el aire seco seguía interrumpiendo el sistema. El inicio de un ciclo de reemplazo de la pared del ojo el 29 de agosto impidió temporalmente la intensificación, pero Dorian completó el ciclo a la mañana siguiente y pronto reanudó el fortalecimiento. Una ráfaga de profundización rápida llevó a Dorian a alcanzar como un huracán categoría 4 en la escala de huracanes de Saffir-Simpson a principios del 31 de agosto, con un ojo distinto y claramente definido. Durante este tiempo, el huracán cada vez más intenso giró hacia el oeste-noroeste y luego hacia el oeste. En otro período de rápido fortalecimiento el 1 de septiembre, Dorian alcanzó la intensidad de la categoría 5, la clasificación más alta en la escala de huracanes de Saffir-Simpson, a las 12:00 UTC. Las cimas de las nubes de Dorian continuaron enfriándose y el ojo aumentó aún más en definición a medida que el huracán se acercaba a las Bahamas, con los vientos llegando a 295 km/h, solo cinco horas más tarde cuando Dorian tocó tierra en Elbow Cay y luego Marsh Harbour del Abaco Island. La presión central alcanzó un mínimo de 910 hPa a las 19:00 UTC del 1 de septiembre mientras el ojo todavía estaba sobre Gran Ábaco, lo que representa la intensidad máxima de Dorian. Posteriormente se produjo un debilitamiento constante cuando Dorian se movió sobre Gran Bahama. Sin embargo, Dorian siguió siendo un huracán importante hasta que comenzó a alejarse de las Bahamas a finales del 3 de septiembre (figura 1).

2.3. Estadígrafos empleados

Los siguientes estadígrafos fueron empleados para realizar la evaluación y verificación de los resultados obtenidos, en los mismos x_i representa a los valores reales (obtenidos de la best track del NHC) y y_i los valores simulados.

2.3.1. BIAS

El *BIAS* proporciona la media de la diferencia entre el valor estimado y el valor real:

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

Entre más cercanos se encuentren los valores del *BIAS* a cero, más precisa es la simulación.

2.3.2. Error Absoluto Medio (MAE)

El error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés) es una medida de cuanto se alejan los valores simulados de los observados:

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

Entre más cercanos se encuentren los valores de MAE a cero, más precisa es la simulación.

2.4. Haversine

Para calcular el error de trayectoria del huracán Dorian con respecto a la *best track preliminar* emitida por el NHC para este sistema, se empleó la función Haversine disponible en el paquete de python *alarconpy* desarrollado por Alarcón (2019) para el postprocesamiento de las salidas del NTHF. Esta función permite calcular la distancia entre dos puntos a partir de conocidos los datos de longitud y latitud de los mismos.

2.5. Aspectos de la corrida

Las corridas realizadas se inicializaron a las 0000 y 1200 UTC con las salidas del GFS a 0.5 grados de resolución obtenidas de <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4/>. Se realizaron corridas desde el 20190827 hasta el 20190907 para un plazo pronóstico de 120 horas. Las condiciones de frontera se actualizaron cada 6 horas y el paso temporal de integración fue de 69 segundos para el dominio de 27 km, mientras que el del dominio interno estuvo en la razón 1/3 con respecto al paso temporal del dominio exterior.

3. Análisis y discusión de los resultados

En esta sección se describen los resultados alcanzados durante la ejecución y evaluación de los pronósticos numéricos de trayectoria e intensidad del huracán Dorian obtenidos por el NTHF para un plazo de pronóstico de 120 horas. La evaluación utilizada para determinar la confiabilidad de los

resultados obtenidos se basó en la metodología punto-punto; para ello se utilizaron los estadígrafos descritos en la subsección [2.3 y 2.4]

3.1. Error de trayectoria

El mismo NHC, una de las máximas autoridades a nivel mundial en el tema, reconoció “la incertidumbre en el pronóstico de la trayectoria” de Dorian desde poco después de su formación (Redacción BBC News Mundo., 2019). Dorian interactuó con la isla Martinica, una isla pequeña que tiene una topografía compleja, además la formación el martes 27 de agosto de un nuevo centro de circulación a unos 80 km aproximadamente más al norte de sus coordenadas anteriores aumentaron la complejidad del pronóstico de su trayectoria; también en su movimiento se veía propenso a enfrentar sistemas climáticos de latitudes medias que podían influir en su desarrollo y movimiento, uno de estos elementos era una baja superior que se extendía sobre Cuba que, según el NHC, se movía hacia el oeste y formaba una fuerte cuña subtropical sobre el Atlántico occidental que obligaría al huracán a girar hacia el oeste-noroeste en su trayectoria hacia Bahamas y Florida, sin embargo, todo indicaba que en algún momento en los próximos días esa cuña se erosionaría por lo que aumentaba la incertidumbre sobre el pronóstico de la trayectoria. En la figura 3 se observa como los errores de trayectoria para las primeras 48 hrs estuvieron por debajo de los 130 km y siguen aumentando hasta las 120 hrs de pronóstico donde alcanza su máximo error de 265 km. Destacar que el error de la trayectoria cometido por el NTHF para el caso del huracán Dorian fue en todos los plazos de tiempo menor a la media de los errores de trayectoria de huracanes del propio sistema NTHF y muy similares a los errores medios del pronóstico oficial del NHC en el período 2013-2017.

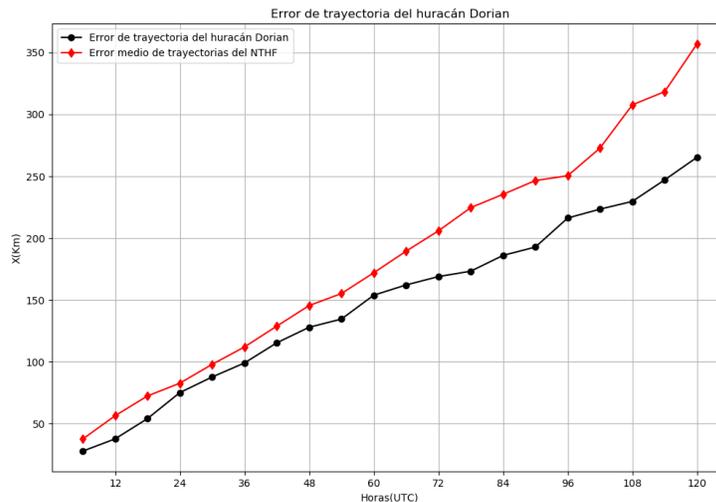


Figura 3: Error de trayectoria simulado por el NTHF para el huracán Dorian.

Un aspecto a destacar en el pronóstico de trayectoria realizado por el sistema NTHF es la habilidad que mostró la herramienta al pronosticar la recurva realizada por el huracán sobre las islas Gran Bahama y Gran Ábaco (figura 4), siendo uno de los modelo que mejor pronosticó dicha recurva.

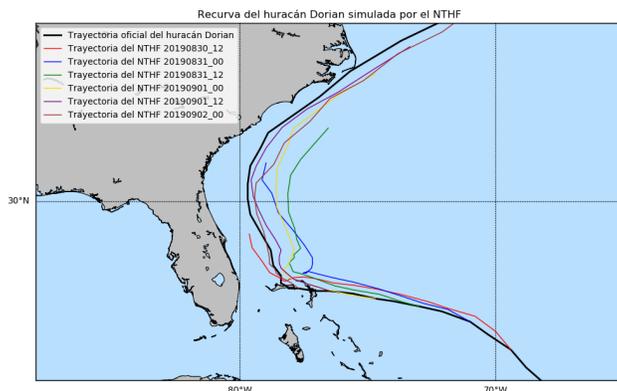
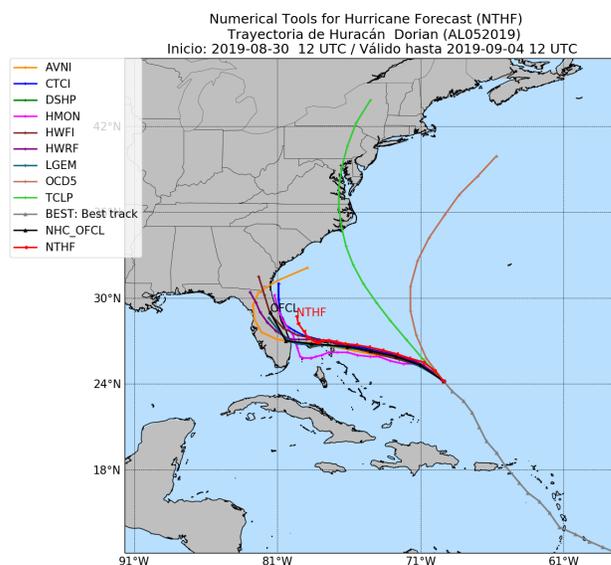


Figura 4: Trayectorias simuladas por el NTHF para varias inicializaciones.

La figura 5 muestra el pronóstico de trayectoria del sistema NTHF y otros modelos disponibles en el ATCF (Automated Tropical Cyclone Forecasting System) para la corrida inicializada el 2019-08-30 a las 12 UTC donde se observa como la recurva simulada por el NTHF fue una de las que mejor representó la realizada realmente por el huracán, a diferencia de la mayoría de los otros modelos que para esta corrida ubicaban a Dorian penetrando la costa oeste de la Florida.



Departamento de Meteorología
Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas



Figura 5: Pronóstico de trayectoria realizado por el NTHF y otros modelos para el huracán Dorian inicializada el 2019-08-30 a las 12 UTC.

3.2. Error de intensidad

En un inicio, cuando se formó Dorian, la tormenta pasó días de gran desorganización y debilidad, debido en gran medida a que las capas de polvo de Sahara en el Caribe frenaron su desarrollo, y aunque al girar más hacia el norte comenzó a ganar en intensidad, continuó siendo hasta poco antes del fin de semana del 31 de agosto y 1 de septiembre un huracán relativamente pequeño, el diámetro que abarcaron los vientos huracanados de Dorian era de apenas 35 km, aunque luego creció hasta los 75 km. Las pequeñas tormentas pueden fortalecerse o debilitarse rápidamente debido a pequeños cambios en su entorno, dado que contienen menos masa (aire, vapor de agua, nubes) para girar o disminuir la velocidad y esto provoca que los pronósticos de intensidad se dificulten en gran manera, lo cual se evidenció en el pronóstico que realizó el sistema NTHF, el cual presentó errores en el pronóstico de la intensidad mayores a los de su propia media.

3.2.1. Velocidad del viento

En la figura 6 se observa como el Sistema NTHF subestima en todos los plazos de tiempo la velocidad del viento del huracán Dorian y en la figura 7 se puede observar como el error absoluto oscila entre los 66 y 75 km/h para las primeras 24 hrs y alcanza su mínimo error a las 48 hrs y luego aumenta hasta las 108 hrs donde vuelve a disminuir para el último plazo de tiempo. Este comportamiento atípico coincide con el del estudio realizado por Alarcón (2019).

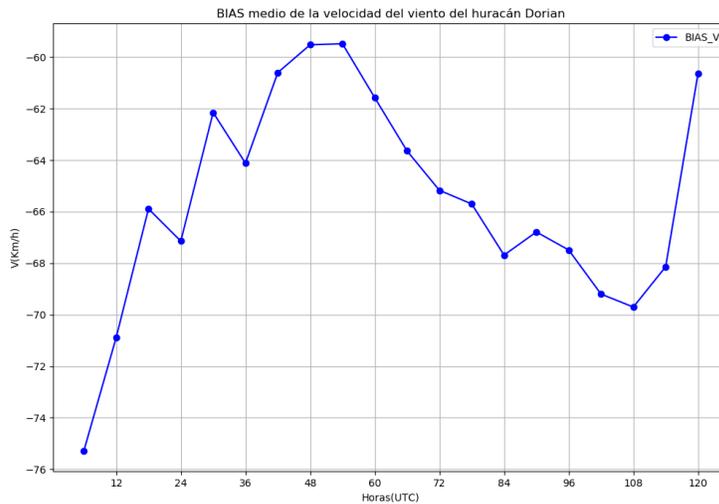


Figura 6: BIAS para la velocidad del viento simulada por el NTHF para el huracán Dorian.

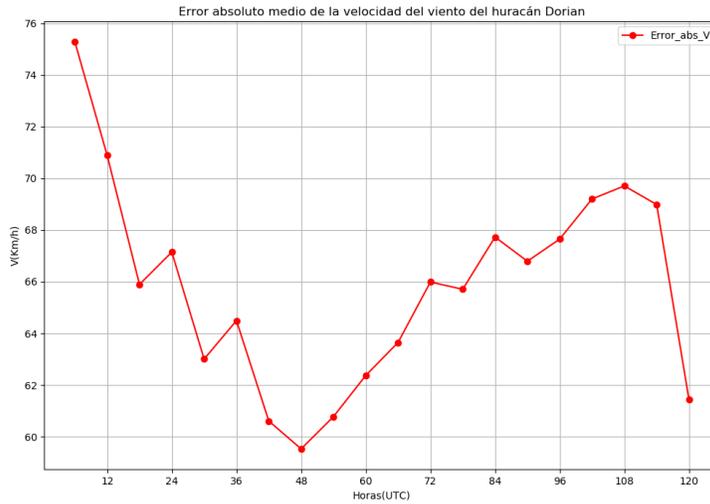


Figura 7: Error absoluto medio para la velocidad del viento simulada por el NTHF para el huracán Dorian.

3.2.2. Presión mínima central

Como se puede observar en la figura 8 hubo una sobreestimación de la presión mínima central en todos los plazos de tiempo con errores que oscilaron de manera general entre los 17 y 24 hPa con un comportamiento que evidencia una disminución continua de los errores para los primeros plazos de tiempo (hasta las 36-48 hrs) y después un aumento de los mismo, con una nueva disminución para el último plazo de tiempo como se puede observar en la figura 9.

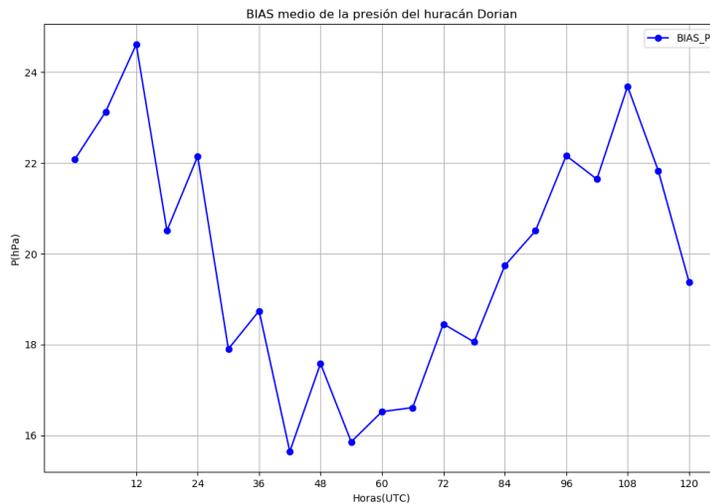


Figura 8: BIAS para la presión simulada por el NTHF para el huracán Dorian.

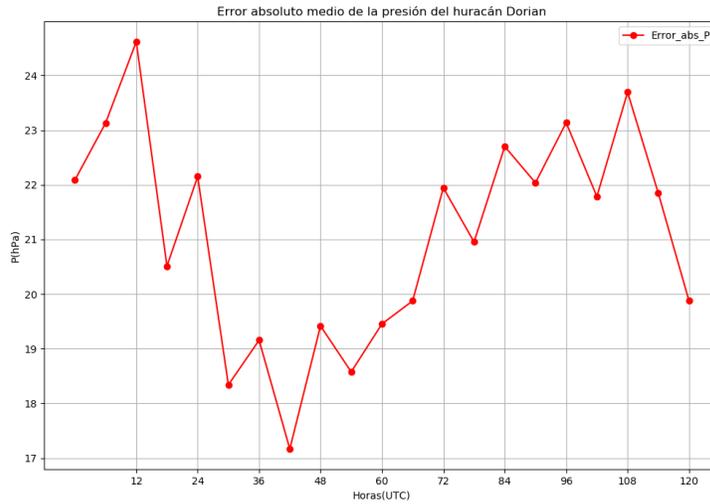


Figura 9: Error absoluto medio para la presión simulada por el NTHF para el huracán Dorian.

4. Conclusiones

- El sistema NTHF simuló acertadamente la trayectoria del huracán Dorian con un error inferior a los 265 km/h para las 120 hrs, representando con mayor precisión el momento en el que ocurrió la recurva.
- El pronóstico de intensidad fue deficiente, con errores máximos de 75 km/h para la velocidad máxima del viento y 25 hPa para la presión mínima central.

5. Recomendaciones

Implementar un algoritmo para la relocalización de vórtice y reajustar los campos meteorológicos en el proceso de inicialización para mejorar los resultados de los pronósticos del sistema NTHF en los primeros plazos de tiempo.

Referencias

Alarcón, A. P. (2019). Sistema para el pronóstico numérico de la intensidad y trayectoria de ciclones tropicales en Cuba. *Tesis en opción al título de Máster en Ciencias Meteorológicas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.*

- Biswas, M. K. and et al. (2017). *Community HWRF Users' Guide*. Disponible en http://www.dtcenter.org/HurrWRF/users/docs/users_guide/HWRF_v3.9a_UG.pdf.
- Janjic, Z. and et al. (2014). User's Guide for the NMM Core of the Weather Research and Forecast (WRF). *Modeling System Version 3.*, pages 1–213.
- Lighthill, J. (1998). Fluid mechanics of tropical cyclones. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 10:3–21.
- Redacción BBC News Mundo. (2019). Disponible en <http://www.bbc.com/mundo/noticias-49530894>.
- Tribou, R., Theisen, T., and Mariscal, J. A. (2019). El huracán Dorian deja estragos en Bahamas. *Diario: Orlando Sentinel*.