

Método de relocalización de vórtice para el sistema de pronóstico numérico de ciclones tropicales NTHF



Vortex relocation method for the Numerical Tools for Hurricane Forecast (NTHF) system

CU-ID: 2377/v28n2e06

 Onel Rodríguez-Navarro^{1*},  Albenis Pérez-Alarcón¹,  Arlett Díaz-Zurita²

¹Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, La Habana 10400, Cuba.

²Oficina Principal de Vigilancia Meteorológica, Empresa Cubana de Navegación Aérea, Carretera Panamericana y Final, Boyeros, La Habana 10800, Cuba.

RESUMEN: En este estudio se evaluó la factibilidad de la aplicación de un esquema de relocalización de vórtice basado en un vórtice sintético en el sistema de pronóstico numérico de ciclones tropicales (CTs) NTHF (Numerical Tools for Hurricane Forecast), operativo en el Departamento de Meteorología del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana. Para ello, se seleccionaron como casos de estudios los huracanes Dorian y Lorenzo y la tormenta tropical Karen. La representación del vórtice sintético en toda la columna vertical se extrajo de las simulaciones de NTHF inicializado con los datos de 0.25 grados de resolución horizontal del GDAS (Global Data Assimilation System) del ciclo de 6 horas antes, y fue introducido en los campos de inicialización de NTHF obtenidos de las salidas pronóstico del modelo global GFS (Global Forecast System) con una resolución horizontal de 0.5 grados. En todos los casos las simulaciones se inicializaron a las 0000 UTC y las condiciones de frontera se actualizaron cada 6 horas. En los experimentos realizados se comprobó que el esquema de relocalización de vórtice representa un CT más estructurado aunque la inestabilidad dinámica causada por la introducción del vórtice sintético en el campo de fondo condicionó que el centro de los CTs se desarrollaran en un ambiente más seco y el centro del sistema fuera más frío, lo que propició un aumento de los errores medios en el pronóstico de trayectoria e intensidad, con respecto a los experimentos sin relocalización de vórtice.

Palabras claves: NTHF, ciclones tropicales, relocalización de vórtice, vórtice sintético, inicialización, pronóstico.

ABSTRACT: This study evaluated the feasibility of applying a vortex relocation scheme based on a synthetic vortex in the Numerical Tools for Hurricane Forecast (NTHF) system, operating in the Department of Meteorology of the Higher Institute of Technologies and Applied Sciences, University of Havana. Hurricanes Dorian and Lorenzo and the tropical storm Karen were selected as case studies. The synthetic vortex in the entire vertical column was extracted from the NTHF simulations initialized with the GDAS (Global Data Assimilation System) outputs at 0.25 of the horizontal resolution of the 6 hours previous cycle. The new vortex replaced the vortex in the initialization fields of NTHF obtained from the forecast outputs of the global GFS (Global Forecast System) model at a horizontal resolution of 0.5 degrees. In all cases, the simulations were initialized at 0000 UTC with the boundary conditions updated every 6 hours. The results revealed that the vortex relocation scheme represented a more structured tropical cyclone (TCs). Nevertheless, the dynamic instability caused by the introduction of the synthetic vortex in the background field conditioned that the center of the TCs developed in a drier environment and the center of the system was colder, which led to an increase in the mean errors in the track and intensity forecast, concerning the experiments without vortex relocation.

Keywords: NTHF, tropical cyclone, vortex relocation, synthetic vortex, initialization, forecast.

*Autor para correspondencia: Onel Rodríguez-Navarro. E-mail: onel.rodriguez@instec.cu

Recibido: 04/02/2022

Aceptado: 16/05/2022

1. INTRODUCCIÓN

El centro regional para el pronóstico de los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico Norte es el NHC (National Hurricane Center), que utiliza, entre otras herramientas, la información de varios modelos operacionales de predicción de huracanes para confeccionar sus pronósticos oficiales. Dentro de los más sofisticados modelos dinámicos, globales y regionales empleados por el NHC para el pronóstico de intensidad y trayectoria se encuentran el GFS (Global Forecast System), el HMON (Hurricanes in a Multi-scale Ocean-coupled Non-hydrostatic) y el HWRF (Hurricane Weather Research and Forecasting Model). En las últimas décadas se ha observado una disminución notable de los errores en el pronóstico oficial de la trayectoria realizado por el NHC, sin embargo, no ha ocurrido de igual manera en el pronóstico de intensidad (Cangialosi et al., 2020).

El aumento de la habilidad en el pronóstico de trayectoria se debe principalmente al aumento de la resolución de los modelos numéricos y la aplicación de algoritmos para una mejor representación del CT en los datos de inicialización (Leroux et al., 2018). El uso de la asimilación de datos de satélite, de los aviones de reconocimiento, así como de estaciones de observación, proporcionan más información para las regiones oceánicas y la atmósfera superior, mejorando de esta manera las condiciones iniciales de los modelos de pronóstico numérico del tiempo (Leroux et al., 2018).

A pesar del desarrollo continuo de los algoritmos de asimilación de datos y la disponibilidad de observaciones, la inicialización adecuada de los modelos de pronóstico de ciclones tropicales y la corrección de los errores de posición en los campos de fondo sigue siendo un desafío. En este sentido, los esquemas de relocalización de vórtice se han utilizado en la predicción numérica del tiempo como un procedimiento para obtener una representación más realista de la tormenta en los datos de inicialización de los modelos. Varios autores (Liu et al., 2000; Pu & Braun, 2001; Wu et al., 2010) demostraron que este procedimiento mejora la predicción de huracanes.

El vórtice sintético se ha propuesto y aplicado ampliamente en la inicialización de modelos numéricos para el pronóstico de huracanes durante más de dos décadas (Kurihara et al., 1993; H. J. Kwon et al., 2002; Leslie & Holland, 1995; Pu & Braun, 2001; Rappin et al., 2013). Un procedimiento típico de vórtice sintético incluye tres pasos: (1) aplicar modelos matemáticos o estadísticos para construir estructuras radiales y verticales del flujo, (2) generar una representación sintética del vórtice, y (3) reemplazar el vórtice sintético generado por el obtenido de la integración del modelo. En comparación con otros métodos, es relativamente simple, flexible y requiere pocos recursos computacionales, lo que explica su empleo en

la inicialización de modelos de pronóstico de huracanes (C. C. Chang, 2018).

Algunos autores (C. C. Chang, 2018; Kurihara et al., 1993; H. J. Kwon et al., 2002; I. H. Kwon & Cheong, 2010; Leslie & Holland, 1995; Pu & Braun, 2001; Rappin et al., 2013) para superar el problema de inconsistencia del modelo con el vórtice sintético propusieron un método para especificar un vórtice inicial en el modelo de predicción de huracanes GFDL. En sus trabajos, el análisis a gran escala se descompone en el flujo ambiental y en la circulación de los vórtices.

Chang (2018) evaluó el impacto del esquema de relocalización en los análisis y pronósticos del GDAS (Global Data Assimilation System)/GFS. Demostrando que, aunque la relocalización fue capaz de reducir el error de posición inicial puede ser perjudicial para el análisis y pronóstico de huracanes, debido a que la asimilación de datos es esencialmente necesaria para mejorar el estado del modelo.

Otro método utilizado es la asimilación de datos, que se ha empleado ampliamente en la inicialización de los modelos en las últimas décadas y ha mostrado mejorar significativamente la habilidad de los mismos para representar la evolución de los ciclones tropicales (Hendricks et al., 2011; Kepert, 2009; Wu et al., 2010; Xiao et al., 2000).

En Cuba, actualmente las configuraciones obtenidas para el WRF (Weather Research and Forecasting)-ARW (Advanced Research WRF) para condiciones medias de la atmósfera en el SisPI (Sistema de Predicción Inmediato) (Sierra et al., 2015) y el SPNOA (Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera) (Pérez-Bello et al., 2019) son 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 sistemas, se ha obtenido que son hábiles para el pronóstico de trayectoria de ciclones tropicales en las primeras 48 horas (Mitrani et al., 2017).

Recientemente en el Departamento de Meteorología del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana (InSTEC-UH) se emplea de forma operativa, durante la temporada ciclónica en la cuenca del Atlántico Norte, el sistema NTHF (Numerical Tools for Hurricane Forecast), el cual fue desarrollado por Pérez-Alarcón, et al., (2021a) para el pronóstico de intensidad y trayectoria de CTs y permite hacer un seguimiento del vórtice desde su formación debido al empleo de mallas móviles durante la integración temporal del modelo. En las evaluaciones realizadas (Pérez-Alarcón et al., 2021a, 2021b) se observó que en los primeros plazos de tiempo se presentan los mayores errores en el pronóstico de intensidad. Este comportamiento se atribuye a que el sistema NTHF no tiene incorporado durante su inicialización un procedimiento para la relocalización de

vórtice y ajuste de los campos meteorológicos. Por otro lado, los datos usados para la inicialización no describen la intensidad de la tormenta reportada por el NHC. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo aplicar un método de relocalización de vórtice y ajuste de los campos meteorológicos en la inicialización del sistema de pronóstico numérico de CTs NTHF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Numerical Tools for Hurricane Forecast (NTHF)

El sistema de pronóstico de ciclones tropicales NTHF, opera durante la temporada ciclónica de la Cuenca del Atlántico Norte, en el Departamento de Meteorología del InSTEC, fue desarrollado por (Pérez-Alarcón et al., 2021a). El sistema está compuesto por algoritmos computacionales que garantizan la inicialización del modelo durante las ejecuciones operacionales y el posterior procesamiento de los resultados obtenidos por el sistema. La figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema NTHF.

El sistema NTHF se basa solo en la componente atmosférica del modelo HWRf; debido a las limitaciones en la capacidad de cómputo instalada en el Departamento de Meteorología del InSTEC-UH. El sistema emplea dos dominios de cómputo anidados interactivos bidireccionales con 27 y 9 km de resolución. El dominio externo cubre aproximadamente un área de 72° x 72°, mientras que el dominio anidado cubre un área de 11° x 10°. Utiliza además una malla del tipo Arakawa E y tiene la posibilidad de mover mallas para el seguimiento de vórtices durante el período de integración del modelo (Pérez-Alarcón et al., 2021a). En la herramienta NTHF se puede seleccionar la cantidad de niveles verticales para las simulaciones. La integración de tiempo se realiza con esquemas de finite difference forward-backward (Mesinger, 1977) para ondas rápidas, esquemas implícitos (Tamsir & Kumar, 2011) para ondas de sonido de propagación vertical, Esquema Adams-Bashforth (Misirli & Gurefe, 2011) para advección horizontal y la fuerza de Coriolis y

el esquema de Crank-Nicholson para la advección vertical (Biswas et al., 2017). Se utiliza el mismo paso de tiempo para todos los términos. En la vertical, se utilizan las coordenadas híbridas sigma-presión. La difusión horizontal se basa en un esquema Smagorinsky de segundo orden (Smagorinsky, 1963).

Las corridas se realizan para un plazo pronóstico de 120 horas y se inicializan a las 0000 y 1200 UTC, con condiciones iniciales y de frontera tomadas de las salidas pronóstico del GFS a 0.5° de resolución horizontal, obtenidas de <https://nomads.ncdc.noaa.gov/datos/gfs4/>. Las condiciones de contorno se actualizan cada 6 horas. El tiempo de integración para el dominio externo (27 km de resolución) es de 69 segundos, mientras que para el dominio interno es de 23 segundos. El NTHF tiene incorporado un algoritmo para detectar la posición (i, j) del dominio anidado en el externo, a partir del centro de la tormenta.

En la tabla 1 se muestran los aspectos fundamentales de la configuración del sistema NTHF. Las parametrizaciones coinciden con las descritas por (Biswas et al., 2017) para la configuración del sistema HWRf de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) para sus corridas operativas en el NCEP (National Centers for Environmental Prediction), durante la temporada ciclónica de 2017.

A diferencia de SisPI y SPNOA que permanecen operativos en el INSMET (Instituto de Meteorología) durante todo el año, el sistema NTHF se usa operativamente cuando el NHC considera que una perturbación atmosférica tiene condiciones para desarrollarse como un CT.

2.2 Casos de estudio

A partir de la evaluación de la habilidad del NTHF para el pronóstico de intensidad y trayectoria de ciclones tropicales realizada por (Pérez-Alarcón et al., 2021a, 2021b), donde se observaron los mayores errores en el pronóstico de intensidad en los sistemas con categoría de huracán, se seleccionaron como casos de estudio los huracanes Dorian y Lorenzo. Además, con el objetivo de generalizar a todas las etapas de desarrollo de un ciclón tropical y ver el comportamiento

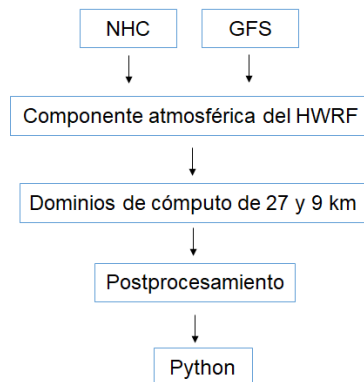


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema NTHF

del modelo numérico con el algoritmo de relocalización de vórtice implementado en esta investigación, se seleccionó además la tormenta tropical Karen. Estos sistemas se formaron en la cuenca del Atlántico Norte en la temporada ciclónica del 2019. En la selección de los casos de estudio no se tuvieron en cuenta las depresiones tropicales, debido a que la intensidad de estos sistemas representada en las salidas pronóstico del GFS es similar a la reportada por el NHC. Por otro lado, para la selección de los casos de estudio se tuvo en cuenta la disponibilidad de los datos del GFS y GDAS. En la [figura 2](#) se observan las trayectorias oficiales de los ciclones tropicales seleccionados como casos de estudio.

2.3 Diseño de los experimentos

2.3.1 Algoritmo de relocalización de vórtice

Las corridas para todos los casos de estudio analizados se inicializaron a las 0000 UTC con las salidas pronóstico del GFS para un plazo de 120 horas. A partir de los datos GDAS, del ciclo de 6 horas previas, se implementó un esquema de relocalización de vórtice en la inicialización del sistema NTHF. El algoritmo empleado se describe a continuación:

1. Se inicializa el sistema NTHF con las salidas del GDAS, del ciclo de 6 horas antes, para un plazo de 6 horas. Para este paso se emplearon los dominios de 27, 9 y 3 km de resolución, garantizando una mayor resolución en el área ocupada por la circulación ciclónica.
2. Se inicializa el sistema NTHF con los datos pronósticos del GFS hasta la corrida del *real.exe*.
3. Se extrae el vórtice ciclónico del fichero *wrfinput_d01*, generado por el *real.exe*, que contiene los datos de inicialización para la corrida, y es reemplazado por el vórtice ciclónico generado en el paso (1).

Las simulaciones del sistema NTHF se realizaron en el clúster de cálculo Benjamin del Departamento de Meteorología del InSTEC-UH. El mismo tiene como sistema operativo Ubuntu 14.04, con 6 nodos de cómputo *Intel core i5* de 4 procesadores físicos y 8 Gb de memoria RAM cada uno.

Para realizar la evaluación y verificación de los resultados obtenidos, se emplearon los estadígrafos: Sesgo (*BIAS*), Error Absoluto Medio (*MAE*), Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*) y Habilidad de Pronóstico (*SS*); según los definen [Jolliffe & Stephenson \(2012\)](#).

Tabla 1. Configuración empleada en el modelo NTHF

Niveles verticales	32
Microfísica	Ferrier-Aligo Scheme
Radiación de onda larga	RRTMG
Radiación de onda corta	RRTMG
Capa superficial	HWRF surface-layer Scheme
Superficie de la tierra	Noah Land Surface Model
Capa frontera planetaria Cúmulos	HWRF Planetary Boundary Layer Scale-Aware Simplified Arakawa-Schubert
Seguimiento de vórtice	GFDL vortex tracker
Relocalización de vórtice	no
Acoplamiento con modelo oceánico	no
Time-step	69 s (27 km)

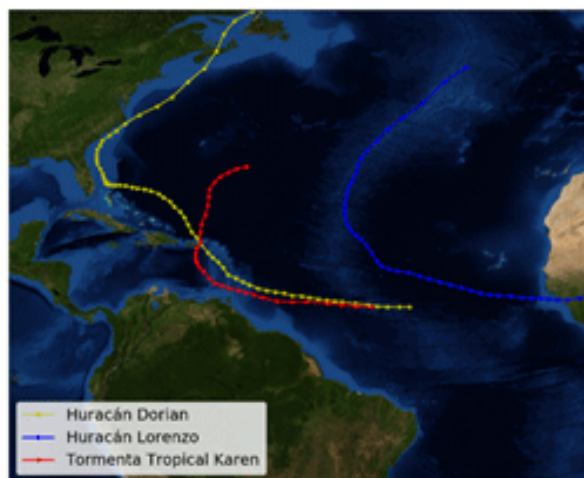


Figura 2. Trayectorias oficiales de los ciclones tropicales utilizados como casos de estudio

3. RESULTADOS

3.1 Análisis del huracán Dorian

En la [figura 3](#) se muestra el campo de viento del huracán Dorian, obtenido a partir de las corridas inicializadas el 1ro y 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC, para los experimentos NTHFVR (NTHF con esquema de relocalización de vórtice) y NTHFNVR (NTHF sin esquema de relocalización de vórtice). En la misma se puede observar como la aplicación del esquema de relocalización de vórtice ([figura 3a y 3c](#)) permite hacer una mejor representación de la estructura del campo de viento asociado al sistema durante la inicialización de NTHF. En ambos experimentos se subestimó en 120 km/h la intensidad de la tormenta, aunque el campo de viento representado por el experimento NTHFVR tiene mayor correspondencia con la estructura real del huracán Dorian. Un comportamiento similar en el campo de viento se obtuvo en el análisis de los otros casos estudiados.

Los cambios en el campo de humedad, que están directamente relacionados con la fuente de calor latente y por tanto asociado a los procesos de intensificación de los ciclones tropicales, son un ejemplo de cómo la relocalización del vórtice puede afectar la estructura de los huracanes.

La [figura 4a](#) muestra un corte vertical zonal en los 27.38° de latitud Norte (coincidiendo con el centro de la tormenta para el experimento con esquema de relocalización de vórtice), donde se observa una disminución de la humedad específica en el centro de la tormenta en los niveles altos, mientras que en los niveles medios y bajos no se aprecia una diferencia significativa. El experimento con el esquema de relo-

calización de vórtice sugiere, para el huracán Dorian en la corrida inicializada el 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC, un ambiente más seco cerca de la pared del ojo hacia el cuadrante suroeste en los 850 hPa ([figura 4b](#))

En estudios relacionados con los procesos de intensificación rápida en los huracanes ([Montgomery & Smith, 2014; Smith et al., 2017](#)) el requisito de suficiente humedad en la región del núcleo es uno de los componentes importantes del soporte termodinámico del huracán. El hecho de presentar un ambiente más seco en la región central inhibe los procesos de intensificación.

En la [Figura 5](#) se observa una tendencia al enfriamiento del centro de Dorian después de aplicada la relocalización, afectando la intensificación del huracán en el pronóstico de NTHF, inicializado el 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC.

En la [figura 6](#) se observa la representación vertical en un corte zonal de la vorticidad absoluta para el huracán Dorian, el 2 de septiembre de 2019 a las 1200 UTC. Las inicializaciones con NTHFVR y NTHFNVR muestran una estructura del ciclón tropical en la vertical muy similar, lo que evidencia la insuficiente habilidad del esquema de vórtice sintético para lograr una mejor representación de la evolución de la tormenta durante el proceso de integración del modelo.

Del 2 al 6 de septiembre de 2019, Dorian experimentó una tendencia al debilitamiento, con una disminución de la velocidad máxima del viento y un aumento gradual de la presión mínima central ([Avila et al., 2020](#)), mientras que en los experimentos realizados no se observan variaciones significativas de la intensidad del sistema.

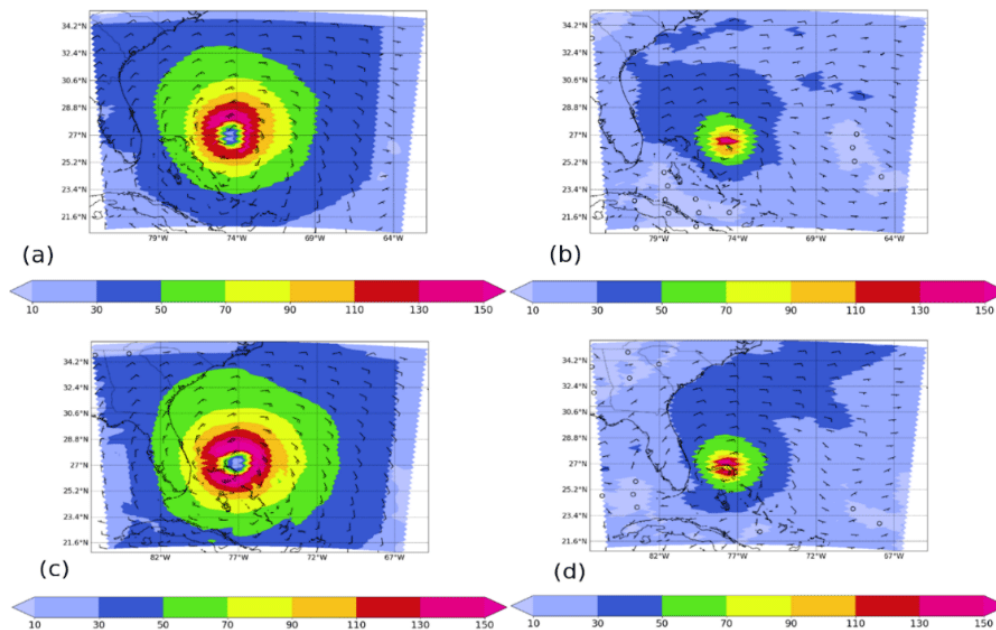


Figura 3. Campo de viento (km/h) del huracán Dorian para las inicializaciones del 2019-09-01 a las 0000 UTC (a, b) y 2019-09-02 a las 0000 UTC (c, d). Los gráficos (a, c) representan el experimento NTHFVR y los gráficos (b, d) el NTHFNVR.

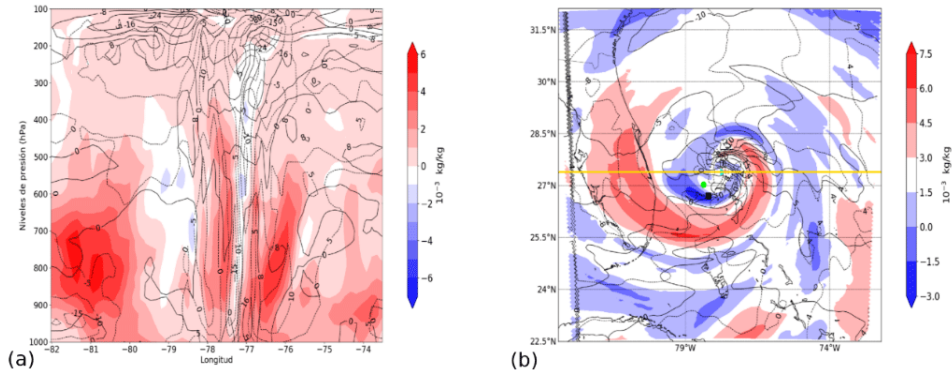


Figura 4. (a) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) en la vertical de humedad específica (color) y velocidad del viento en m/s (contorno), y (b) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) horizontal entre los campos de humedad específica en 850 hPa para las 12 horas de pronóstico a partir de la inicialización del 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC. El triángulo azul, el círculo verde y el cuadrado negro representan la posición del centro del sistema para los experimentos NTHFVR y NTHFNVR y la *best track* respectivamente.

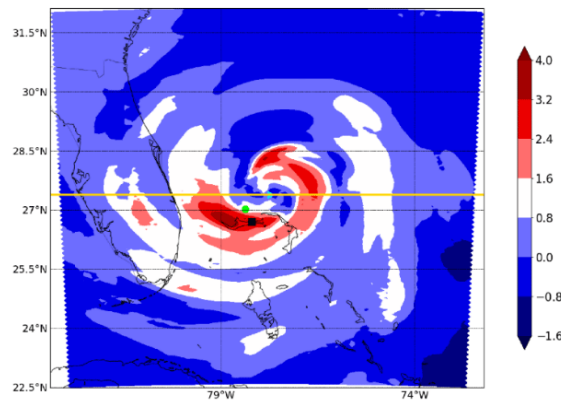


Figura 5. Diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) del campo de temperatura en °C en 850 hPa

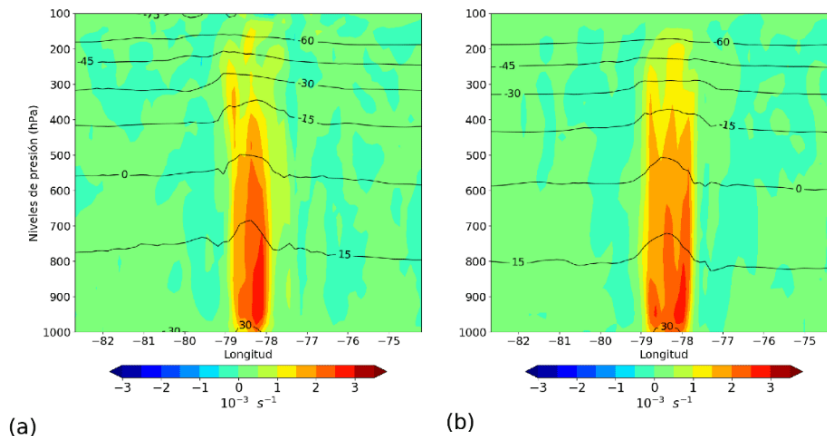


Figura 6. Corte vertical zonal del pronóstico de la vorticidad absoluta (color) y la correspondiente temperatura en °C (líneas continuas) para el experimento NTHFVR (a) y para el NTHFNVR (b)

El comportamiento observado anteriormente tiene impactos significativos en el pronóstico de intensidad y trayectoria. Según [Avila et al. \(2020\)](#) el pronóstico de trayectoria de Dorian resultó complejo. Durante las primeras etapas de desarrollo, mientras Dorian estaba

ubicado en el sureste del Mar Caribe, la reformación de su centro después de cruzar Santa Lucía provocó un cambio significativo en la trayectoria. Algunos modelos de predicción numérica del tiempo pronosticaron una disminución de la velocidad de traslación

de Dorian al noroeste de las Bahamas, sin embargo, en ninguno de los casos se pronosticó el movimiento estacionario sobre esta zona. La dificultad mayor en la predicción de la trayectoria de Dorian estuvo en la recurva que experimentó el sistema hacia el nortenordeste cuando se encontraba sobre el archipiélago de las Bahamas (Avila et al., 2020). En este sentido, NTHFNVR, mostró habilidad en el pronóstico de la recurva, no ocurriendo de igual forma en las simulaciones con el vórtice sintético, como se muestra en la figura 7.

De forma general, el esquema NTHFNVR fue superior a NTHFVR para el pronóstico de trayectoria de Dorian en todos los plazos de tiempo, como se muestra en la figura 8, aunque la habilidad del NTHF para la predicción de la trayectoria seguida por Dorian fue inferior a la del NHC.

Por otro lado, Ávila et al. (2020), plantean que los errores en el pronóstico oficial de intensidad realizado por el NHC para el huracán Dorian fueron superiores a los errores medios de los últimos 5 años. Este comportamiento se atribuye a que la mayoría de los

grandes errores están relacionados con el hecho de que el centro del huracán Dorian no cruzó sobre La Española, así como al pronóstico de un proceso de rápida intensificación cuando el sistema estaba cerca de las Bahamas, proceso que no ocurrió realmente. Ninguno de los modelos de intensidad pudo simular la tendencia de intensidad de Dorian 5 días antes de que el huracán alcanzara su máxima intensidad.

En el caso del pronóstico de la velocidad máxima del viento, el NTHFVR muestra un comportamiento atípico que coincide con el descrito por (Pérez-Alarcón et al. 2021a), pues se observa una disminución del error medio a medida que aumentan los plazos de tiempo (figura 9a). Los errores medios oscilaron entre los 80 km/h para las primeras 6 horas de pronóstico hasta los 50 km/h para las 120 horas, presentando errores similares a los modelos HWRF, GFS y DSHIFOR5 a partir de las 72 horas de pronóstico (figura 9a). En la figura 9b se observa que en todos los plazos de tiempo el NTHFVR subestima la velocidad máxima del viento alcanzada por el huracán Dorian; sin embargo, mostró mejor habilidad que el

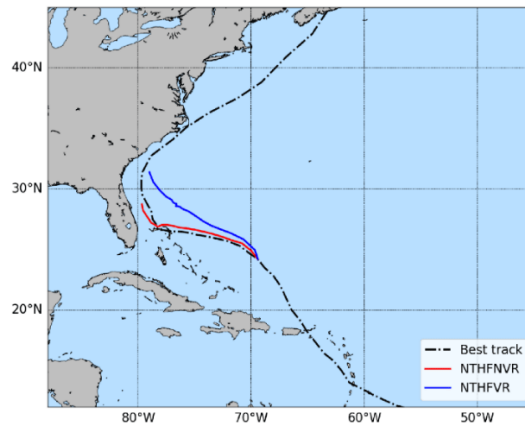


Figura 7. Trayectoria del huracán Dorian para el experimento NTHFNVR (azul), el experimento NTHFVR (rojo) y la best track (negro), para la corrida inicializada el 30 de agosto de 2019 a las 1200 UTC

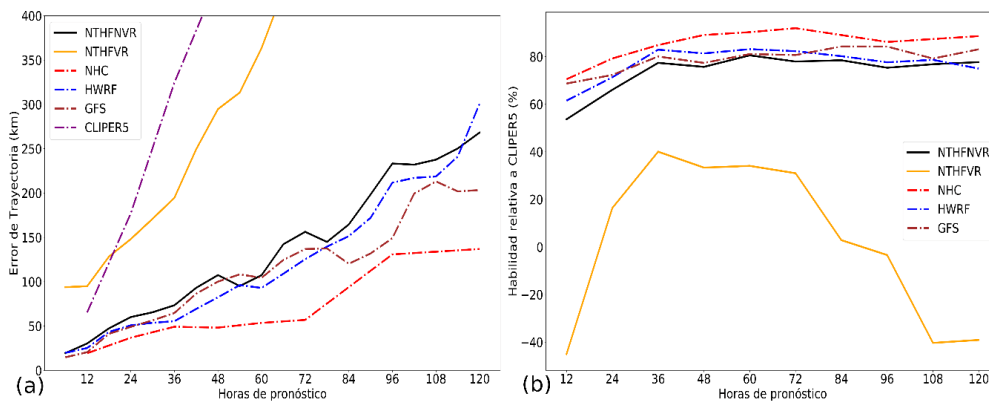


Figura 8. (a) error en el pronóstico de trayectoria y (b) habilidad para el pronóstico de trayectoria del NTHFNVR y el NTHFVR para el huracán Dorian. Se han representado además los errores de los modelos HWRF y GFS, así como los del pronóstico oficial del NHC.

NTHFNVR y un sesgo similar a los modelos HWRF y GFS a partir de las 72 horas de pronóstico. De manera general, el pronóstico de velocidad máxima del viento realizado por NTHFVR y NTHFNVR tuvo un comportamiento similar en las primeras 48 horas; mientras que, en los plazos de tiempo posteriores, el sistema NTHFVR mostró mejor habilidad con una disminución del error en el pronóstico de la velocidad máxima del viento. En todas las horas de pronóstico los errores fueron superiores a los errores medios del pronóstico oficial del NHC (figura 9a).

Para la presión mínima central, los errores cometidos por el NTHFVR oscilaron entre los 23 hPa para las primeras horas hasta los 16 hPa en las 120 horas, mostrando errores inferiores que el NTHFNVR hasta las 108 horas de pronóstico (figura 10a). En la figura 10b se puede observar como el NTHFVR sobrestima los valores de presión mínima central del huracán Dorian para los primeros plazos de tiempo y a partir de las 48 horas de pronóstico el sesgo se encuentra muy próximo a cero, oscilando alrededor de ± 5 hPa, lo que implica la similitud de los valores simulados con los valores reales. Para todos los plazos de tiempo NTHFVR presentó una sobrestimación de la presión mínima central menor que la del NTHFNVR.

3.2 Análisis del huracán Lorenzo

En la figura 11 se muestra el impacto de la relocalización en el campo de humedad a las 6 horas de pronóstico, para la inicialización del 29 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC. En la figura 11a se observa que, tras aplicar el esquema de relocalización de vórtice, el ambiente en zonas alrededor del centro del sistema en los 850 hPa se vuelve más seco, y en la figura 11b se aprecia en un corte vertical zonal en los 25.47° de latitud Norte (coincidiendo con el centro de la tormenta para el experimento con esquema de relocalización de vórtice) como la humedad específica disminuyó en toda la vertical en zonas cercanas al centro de la tormenta y sus alrededores.

Aunque la disminución de la humedad observada no fue muy significativa, sí se puede apreciar, en el experimento con algoritmo de relocalización de vórtice, una notable disminución de la temperatura y una tendencia al enfriamiento en la zona central de Lorenzo (figura 12), lo cual afecta el desarrollo de la estructura e intensificación del sistema.

La figura 13 muestra una comparación de la vortici- dad absoluta del huracán Lorenzo para los experimentos NTHFVR y NTHFNVR mediante un corte vertical

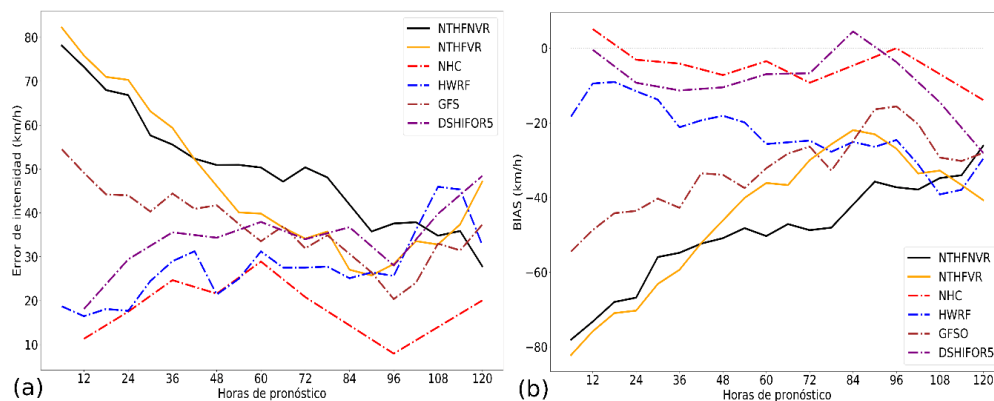


Figura 9. (a) error en el pronóstico de velocidad máxima del viento y (b) sesgo del pronóstico de velocidad máxima del viento del NTHFVR, el NTHFNVR y otros modelos disponibles, para el caso del huracán Dorian

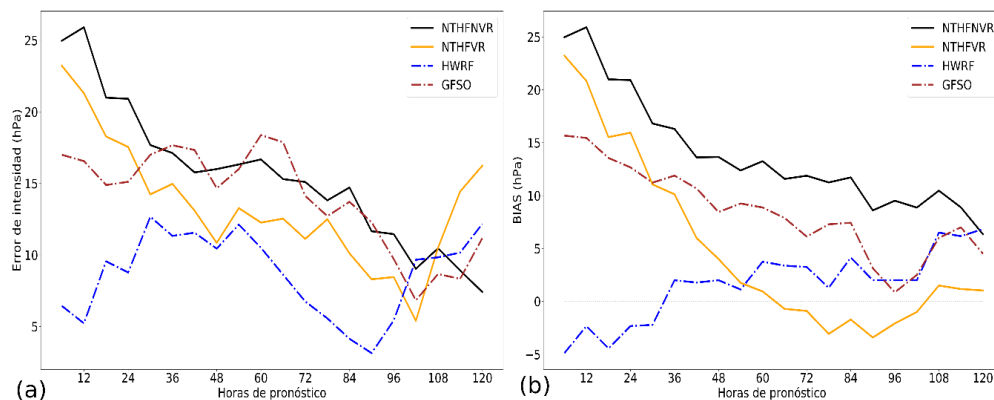


Figura 10. (a) error en el pronóstico de presión mínima central y (b) sesgo del pronóstico de presión mínima central del NTHFVR, el NTHFNVR y otros modelos disponibles, para el caso del huracán Dorian

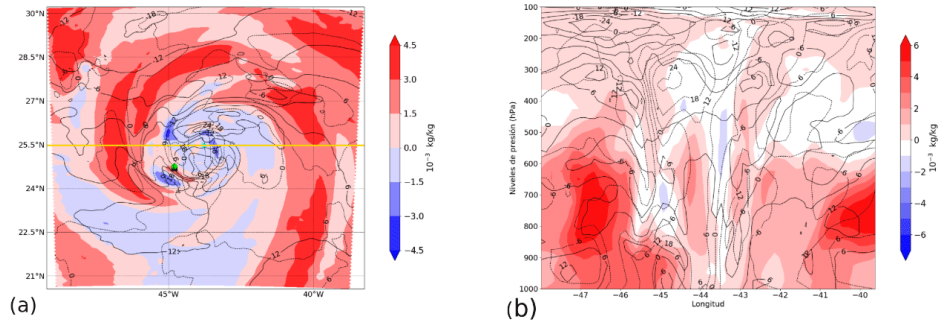


Figura 11. (a) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) horizontal entre los campos de humedad específica en 850 hPa, y (b) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) en la vertical de humedad específica (color) y velocidad del viento en m/s (contorno) para las 12 horas de pronóstico, a partir de la inicialización del 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC

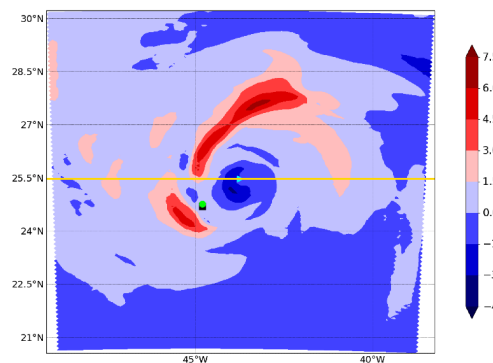


Figura 12. Diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) del campo de temperatura en °C en 850 hPa.

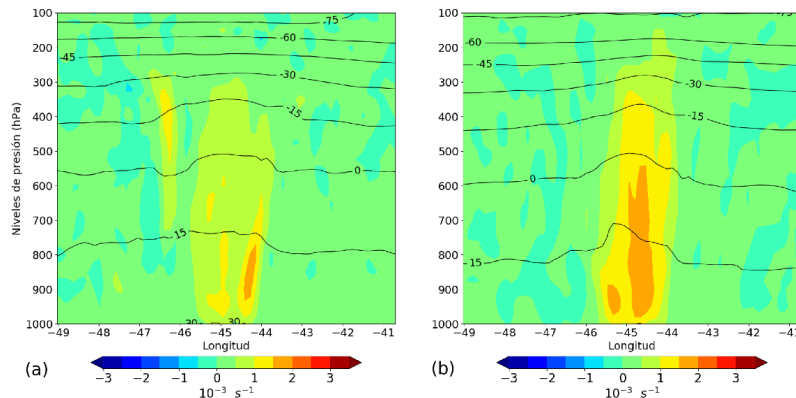


Figura 13. Corte vertical zonal del pronóstico de la vorticidad absoluta (color) y la correspondiente temperatura en °C (líneas continuas) para el experimento NTHFVR (izquierda) y para el NTHFNVR (derecha).

zonal, el 29 de septiembre de 2019 a las 0600 UTC. La comparación muestra que la inicialización del experimento NTHFNVR representó mejor la estructura vertical del huracán, principalmente en los niveles bajos y medios de la tropósfera, evidenciando que NTHFNVR es más hábil para la representación de la tormenta.

Las implicaciones de la aplicación del esquema de relocalización de vórtice se ven reflejadas con un impacto negativo en el pronóstico de intensidad y tra-

yectoria del huracán. En el caso del pronóstico de trayectoria se puede observar, en la figura 14, como el experimento NTHFVR presenta errores de trayectoria mucho mayores en todos los plazos de tiempo que el NTHFNVR y por tanto una menor habilidad para su pronóstico.

En el pronóstico de la velocidad máxima del viento el experimento NTHFVR mostró un decrecimiento del error medio a medida que aumentaba el horizonte temporal, comportamiento atípico descrito por Pérez-

Alarcón et al. (2021a). Los errores del NTHFVR oscilaron entre los 80 km/h para las primeras 6 horas de pronóstico y los 30 km/h para las 120 horas. Para los plazos de tiempo inferiores a las 108 horas de pronóstico NTHFNVR mostró mayor habilidad que NTHFVR; sin embargo, presentaron errores superiores a los del pronóstico oficial del NHC, como se muestra en la figura 15a. En la figura 15b se puede observar como durante las 120 horas de pronóstico ocurre una subestimación de la velocidad máxima del viento, por lo que el sistema pronosticado fue mucho más débil que el real.

Los errores cometidos en el pronóstico de la presión mínima central por el NTHFVR oscilaron entre los 10 y los 20 hPa durante las 120 horas de pronóstico, siendo inferiores a los errores cometidos por el NTHFNVR en las primeras 48 horas, pero superiores en el resto de las horas de pronóstico (figura 16a). La figura 16b muestra como los experimentos NTHFVR y NTHFNVR tienen un comportamiento similar, con una sobrestimación de los valores de presión mínima central durante las horas de pronóstico, aunque la sobrestimación cometida por el NTHFVR fue menor.

En resumen, se evidencia que la aplicación del algoritmo de relocalización de vórtice no contribuye a au-

mentar la habilidad del sistema NTHF en el pronóstico de intensidad del huracán Lorenzo, debido a que el ciclón modelado presenta una intensidad inferior a la estimada por NTHFNVR y a la reportada por el NHC.

3.3 Análisis de la tormenta tropical Karen

La figura 17a muestra como el experimento con esquema de relocalización de vórtice sugiere un ambiente más seco, en las regiones del centro y cerca de la pared del ojo del sistema en el nivel de 850 hPa a las 6 horas de inicializado el pronóstico. En la figura 17b se aprecia el corte vertical zonal de la tormenta tropical Karen (la latitud por la que se realizó el corte vertical coincide con el centro de la tormenta para el experimento con esquema de relocalización de vórtice), en la misma se aprecia como, al ser Karen, el sistema más débil de los casos de estudio analizados, no existe una disminución significativa de los valores de humedad específica, aunque cerca de la superficie en la región central y hacia la parte izquierda en niveles medios se puede apreciar un ambiente más seco.

Como se puede apreciar en la figura 18, la diferencia entre los campos de temperatura en el nivel de 850 hPa muestra valores muy cercanos a cero en las

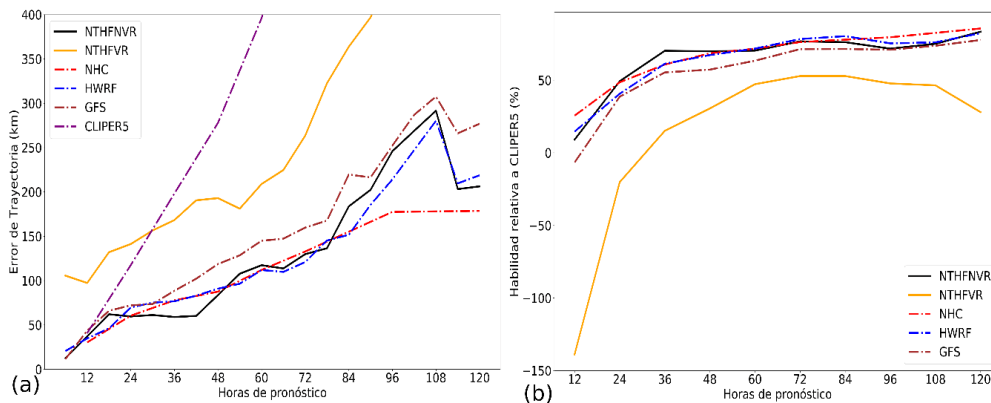


Figura 14. (a) error en el pronóstico de trayectoria y (b) habilidad para el pronóstico de trayectoria del NTHFVR y el NTHFNVR para el huracán Lorenzo. Se han representado además los errores de los modelos HWRF y GFS, así como los del pronóstico oficial del NHC.

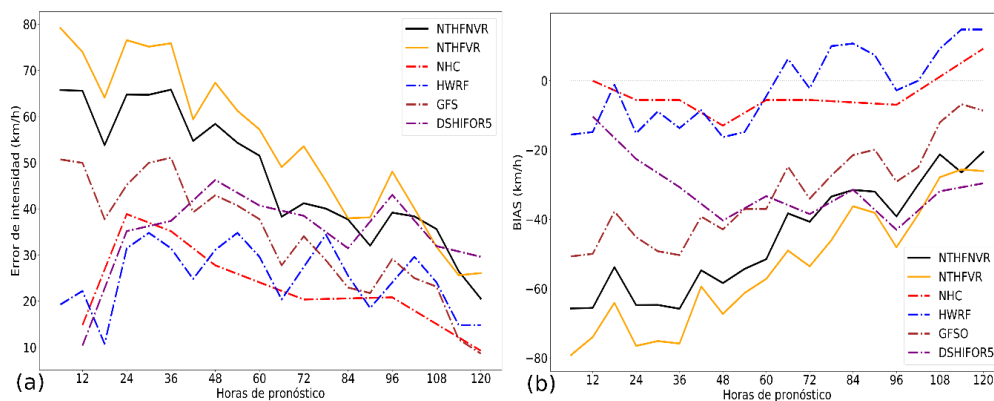


Figura 15. (a) error en el pronóstico de velocidad máxima del viento y (b) sesgo del pronóstico de velocidad máxima del viento del NTHFVR, el NTHFNVR y otros modelos disponibles, para el caso del huracán Lorenzo

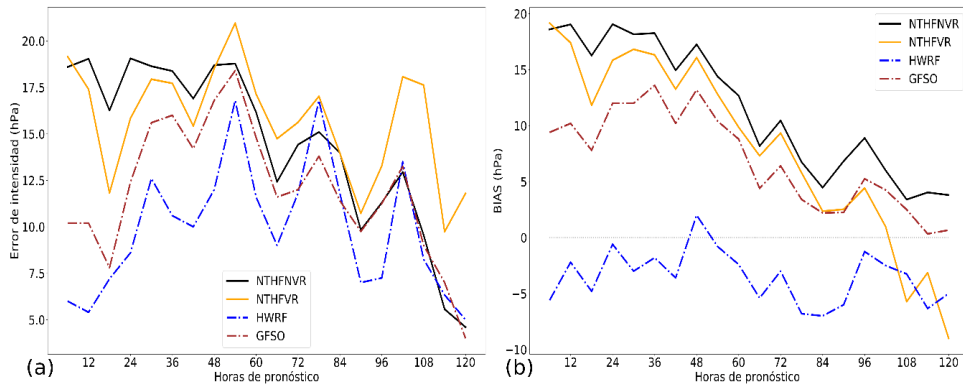


Figura 16. (a) error en el pronóstico de presión mínima central y (b) sesgo del pronóstico de presión mínima central del NTHFVR, el NTHFVR y otros modelos disponibles, para el caso del huracán Lorenzo

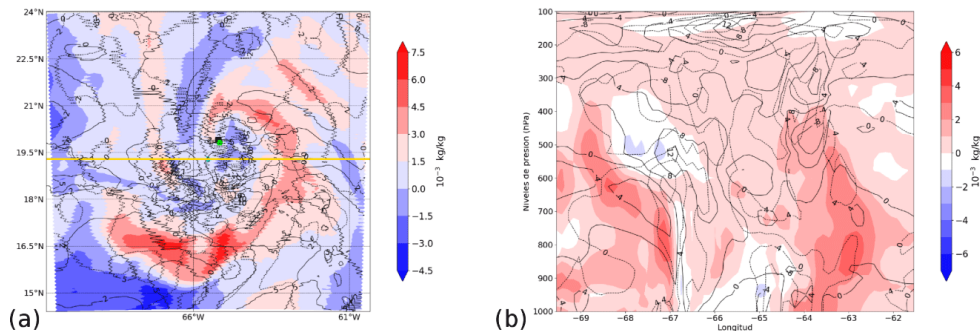


Figura 17. (a) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) horizontal entre los campos de humedad específica en 850 hPa, y (b) diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) en la vertical de humedad específica (color) y velocidad del viento en m/s (contorno) para las 12 horas de pronóstico, a partir de la inicialización del 2 de septiembre de 2019 a las 0000 UTC

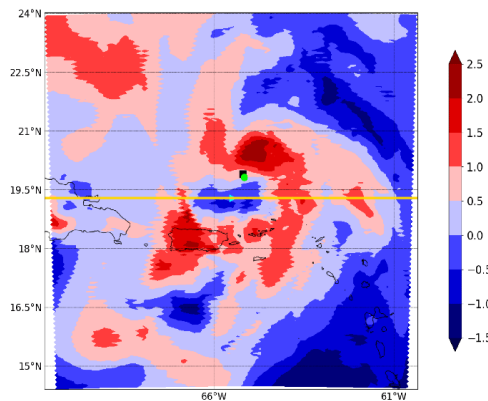


Figura 18. Diferencia (NTHFVR-NTHFNVR) del campo de temperatura en °C en el nivel de 850 hPa

regiones cercanas al centro de la tormenta tropical, lo cual indica que en ambos experimentos se representó el campo de temperatura de forma similar.

La figura 19 muestra una comparación de la vortici- dad absoluta de la tormenta tropical Karen para los experimentos NTHFVR y NTHFNVR mediante un corte vertical zonal del 25 de septiembre de 2019 a las 0600 UTC. La comparación muestra que no se obser- van diferencias significativas entre ambos experimen- tos. La diferencia en la estructura entre el NTHFVR y el NTHFNVR observada en el análisis anterior es menor debido a que Karen, al ser una tormenta tropical, es un sistema con una intensidad significativamente

inferior a la de los huracanes, lo cual está en corres- pondencia con los resultados descritos por Pérez-Alar- cón *et al.* (2021a)

En la figura 20 se representan los errores en el pro- nóstico de trayectoria del NTHFVR y el NTHFNVR para la tormenta tropical Karen, donde se observa como el experimento NTHFNVR mostró los meno- res errores durante la simulación y, en consecuencia, muestra una mayor habilidad que el NTHFVR para el pronóstico de trayectoria.

En el pronóstico de velocidad máxima del viento para el caso de Karen (figuras 21a y 21b), los erro- res oscilaron entre los 2.5 y los 24 km/h durante el

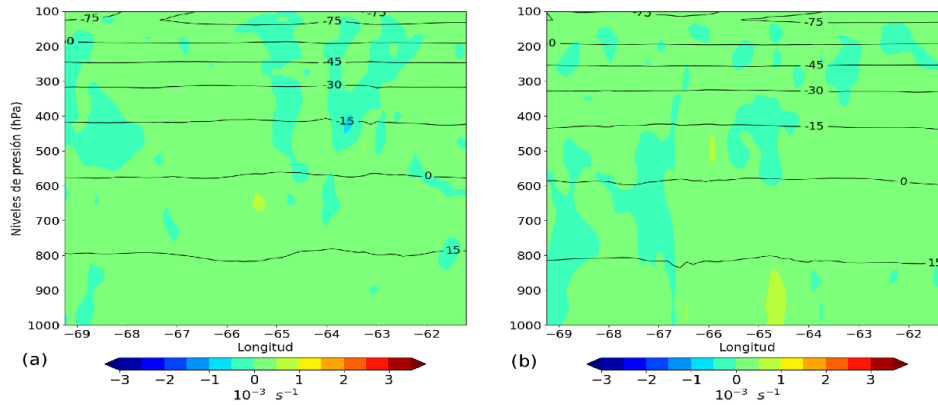


Figura 19. Corte vertical zonal del pronóstico de la vorticidad absoluta (color) y la correspondiente temperatura en °C (líneas continuas) para el experimento NTHFVR (izquierda) y para el NTHFNVR (derecha)

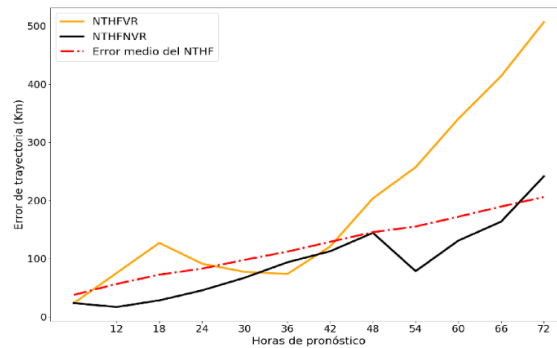


Figura 20. Error en el pronóstico de trayectoria del NTHFVR, el NTHFNVR y el error medio del NTHF para la tormenta tropical Karen

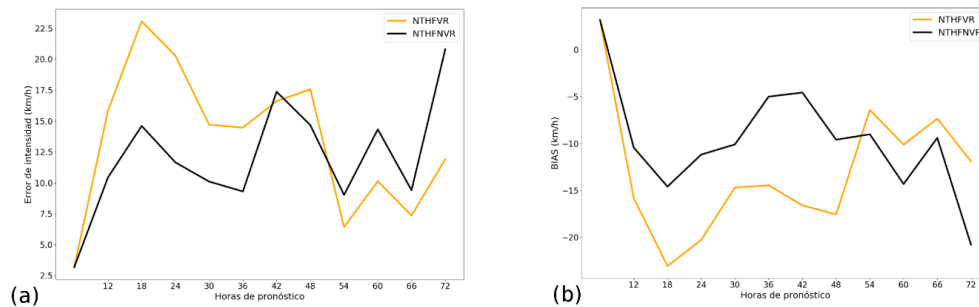


Figura 21. (a) representa el error y (b) el sesgo del pronóstico de velocidad máxima del viento del NTHFVR y el NTHFNVR para el caso de la tormenta tropical Karen

pronóstico. El NTHFVR presentó sus mayores errores durante las primeras 12 horas, con un error máximo de 24 km/h, seguido de una disminución de los errores en los restantes plazos de tiempo. Los errores cometidos por el NTHFVR fueron superiores a los del NTHFNVR en las primeras 48 horas de pronóstico e inferiores a este en el resto de los plazos. El experimento NTHFVR subestimó los valores de velocidad máxima del viento durante todo el pronóstico.

En la [figura 22](#) se puede observar el comportamiento de los errores cometidos por el NTHFVR y el NTHFNVR, en el pronóstico de la presión mínima central para la tormenta tropical Karen. En las [figuras 22a](#) y [22b](#), se observa como ambos experimentos

muestran un comportamiento similar, con errores que oscilan entre los 2 y los 5 hPa para las primeras 24 horas. Posteriormente los menores errores en el pronóstico se observan en los experimentos con NTHFVR, con un error máximo de 1 hPa.

3.4 Resumen de los casos analizados

En todos los casos analizados, la aplicación del esquema de relocalización de vórtice arrojó los mejores resultados en la representación de la estructura del campo de viento en la inicialización de NTHF. Este resultado no garantizó que la intensidad, trayectoria y estructura del sistema tropical pronosticado fuese más

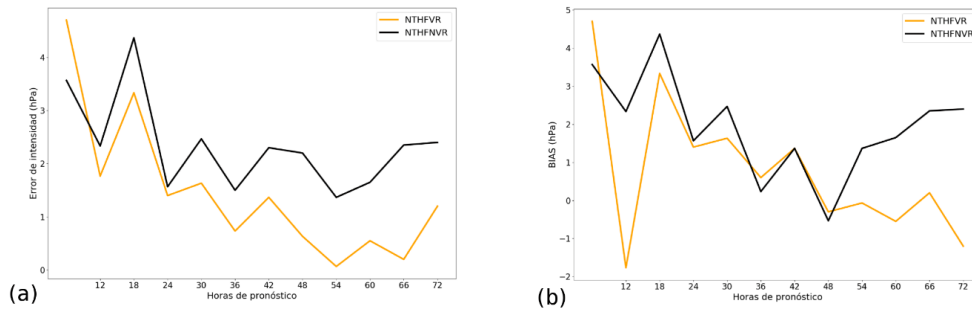


Figura 22. (a) representan el error y (b) el sesgo del pronóstico de presión mínima central del NTHFVR y el NTHFNVR para el caso de la tormenta tropical Karen

realista. Es muy importante lograr que el vórtice inicial sea dinámica y termodinámicamente consistente y que sea compatible con la resolución y la física del modelo (Pu & Braun, 2001). Dado que la circulación de fondo se modifica después de la relocalización, se puede afectar la estructura y el pronóstico del ciclón tropical al aplicar esquemas de relocalización de vórtice (Chang, 2018).

Durante la evaluación de los casos, se pudo apreciar mediante el análisis de los campos de humedad, temperatura y vorticidad, el impacto de la relocalización de vórtice a través de un esquema de vórtice sintético, en el pronóstico de intensidad y trayectoria de los huracanes y tormentas tropicales. En el pronóstico de trayectoria el NTHFVR mostró errores superiores y una habilidad inferior en todos los plazos de tiempo que el NTHFNVR, debido que al aplicar la relocalización de vórtice ocurre un desplazamiento significativo del centro de la tormenta con respecto a la posición reportada por el NHC. En el caso del pronóstico de intensidad, al aplicar la relocalización de vórtice, los resultados no presentaron una tendencia similar entre los casos de estudio, sino que se observaron marcadas diferencias entre ellos. Para el huracán Dorian, los resultados del NTHFVR en el pronóstico de intensidad fueron superiores de manera general a los del NTHFNVR, mientras que para el huracán Lorenzo NTHFNVR mostró mayor habilidad en el pronóstico de intensidad. Para el pronóstico de velocidad máxima del viento y presión mínima central de la tormenta tropical Karen, el NTHFVR mostró un comportamiento similar al NTHFNVR para las primeras horas de pronóstico y una disminución de los errores en los plazos de tiempo posteriores. De manera general el NTHFVR tuvo una habilidad inferior al NTHFNVR, con un aumento del 153.4 % y del 2.23 % de los errores medios en el pronóstico de trayectoria e intensidad respectivamente, sin embargo, mejoró el pronóstico de presión mínima central en un 22.5 %.

4. CONCLUSIONES

1. Se desarrollaron los algoritmos numéricos que permiten incorporar un esquema de relocalización de vórtice, en el sistema de pronóstico numérico de CTs NTHF.

2. Se comprobó que el esquema de relocalización de vórtice representa un ciclón tropical más estructurado, aunque se observaron diferencias significativas en la intensidad para el caso de los huracanes, al compararla con los reportes del NHC.
3. En todos los casos el uso del vórtice sintético condujo a que el ciclón tropical se desarrollara en un ambiente más seco y el centro fuera más frío, lo cual propició un aumento del error medio del 153.4 % y del 2.23 % en el pronóstico de trayectoria e intensidad respectivamente, respecto a las simulaciones de NTHF sin el esquema de relocalización de vórtice, aunque se observó una disminución del error en la predicción de la presión mínima central del 22.5 %.
4. Se demostró que no es factible el empleo de un esquema de relocalización de vórtice basado en un vórtice sintético en la inicialización de NTHF, debido a que no es consistente con la formulación físico-matemática del modelo e induce discontinuidades en los campos meteorológicos que afectan la estabilidad numérica durante el proceso de integración, y a su vez, la habilidad de este para el pronóstico preciso de la intensidad y la trayectoria de los ciclones tropicales.

5. REFERENCIAS

- Avila, L., Stewart, S., Berg, R., & Hagen, A. B. (2020). *Tropical Cyclone Report, Hurricane Dorian* (Tropical Cyclone Report, p. 74). https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL052019_Dorian.pdf
- Biswas, M., Carson, L., Newman, K., Bernardey, L., Kalina, E., Grell, E., & Frimel, J. (2017). *Community HWRP Users' Guide* (3.9a; Número 3.9a).
- Cangialosi, J. P., Blake, E., DeMaria, M., Penny, A., Latta, A., Rappaport, E., & Tallapragada, V. (2020). Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the National Hurricane Center. *Weather and Forecasting*, 35(5), 1913-1922. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0059.1>

- Chang, C. C. (2018). *The impact of the vortex relocation scheme on hurricane initialization: Hurricane Joaquín (2015) as an example* [Masters of Science]. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland College Park.
- Hendricks, E. A., Peng, M. S., Ge, X., & Li, T. (2011). Performance of a dynamic initialization scheme in the Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System for tropical cyclones (COAMPS-TC). *Weather and forecasting*, 26(5), 650-663. <https://doi.org/10.1175/WAF-10-05051.1>
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2012). *Forecast verification: A practitioner's guide in atmospheric science*. John Wiley & Sons.
- Kepernt, J. D. (2009). An Observation Operator for the Variational Assimilation of Vortex Position and Intensity. *Extended Abstracts*, 1-106.
- Kurihara, Y., Bender, M. A., & Ross, R. J. (1993). An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Monthly weather review*, 121(7), 2030-2045. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2030:AISOHM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2030:AISOHM>2.0.CO;2).
- Kwon, H. J., Won, S.-H., Ahn, M.-H., Suh, A.-S., & Chung, H.-S. (2002). GFDL-type typhoon initialization in MM5. *Monthly weather review*, 130(12), 2966-2974. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2966:GTTIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2966:GTTIM>2.0.CO;2).
- Kwon, I. H., & Cheong, H. B. (2010). Tropical cyclone initialization with a spherical high-order filter and an idealized three-dimensional bogus vortex. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1344-1367. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2943.1>.
- Leroux, M.-D., Wood, K., Elsberry, R. L., Cayan, E. O., Hendricks, E., Kucas, M., Otto, P., Rogers, R., Sampson, B., & Yu, Z. (2018). Recent advances in research and forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall. *Tropical Cyclone Research and Review*, 7(2), 85-105. <https://doi.org/10.6057/2018TCRR02.02>.
- Leslie, L. M., & Holland, G. (1995). On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: A comparison of vortex profiles. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 56(1), 101-110. <https://doi.org/10.1007/BF01022523>.
- Liu, Q., Marchok, T., Pan, H.-L., Bender, M., & Lord, S. (2000). *Improvements in hurricane initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL) models* (p. 7) [Informe abreviado]. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, Science Division.
- Mesinger, F. (1977). Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. *Contributions to Atmospheric Physics*, 50, 200-210.
- Misirli, E., & Gurefe, Y. (2011). Multiplicative adams bashforth-moulton methods. *Numerical Algorithms*, 57(4), 425-439. <https://doi.org/10.1007/S11075-010-9437-12>.
- Mitrani, I., Pérez-Bello, A., Vichot, A., Alonso, Y., González, Y., & Díaz, O. (2017). Numerical forecast of weather and wind waves, using WRF and WW3, on the Cuban territory and surrounding waters, and comparison with MM5+ WW3. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 18(2), 86-100.
- Montgomery, M. T., & Smith, R. K. (2014). Paradigms for tropical cyclone intensification. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 64, 37-66.
- Pérez-Alarcón, A., Fernández-Alvarez, J. C., & Batista-Leyva, A. J. (2021). Performance Evaluation of Numerical Tools for Hurricane Forecast (NTHF) System during 2020 North Atlantic Tropical Cyclones Season. *Environmental Sciences Proceedings*, 8(1), 22. <https://doi.org/10.3390/ecas2021-10332>.
- Pérez-Alarcón, A., Fernández-Alvarez, J., Díaz, O., Batista-Leyva, A., & Pérez, R. (2021). System for numerical forecast of intensity and trajectory of tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Revista Cubana de Meteorología*, 27(1).
- Pérez-Bello, A., Mitrani-Arenal, I., Díaz-Rodríguez, O. O., Wettre, C., & Hole, L. R. (2019). A numerical prediction system combining ocean, waves and atmosphere models in the Inter-American Seas and Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1), 109-120.
- Pu, Z.-X., & Braun, S. A. (2001). Evaluation of bogus vortex techniques with four-dimensional variational data assimilation. *Monthly Weather Review*, 129(8), 2023-2039. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2023:EOBVTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2023:EOBVTW>2.0.CO;2).
- Rappin, E. D., Nolan, D. S., & Majumdar, S. J. (2013). A highly configurable vortex initialization method for tropical cyclones. *Monthly weather review*, 141(10), 3556-3575. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00266.1>.
- Sierra, M., Ferrer, A. L., Valdés, R., González, Y., Cruz, R., Borrajero-Montejo, I., & Rodríguez, C. (2015). *Automatic mesoscale prediction system of four daily cycles* (p. 65) [Reporte de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99-164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).
- Smith, R. K., Zhang, J. A., & Montgomery, M. T. (2017). The dynamics of intensification in a Hurricane Weather Research and Forecasting simulation of Hurricane Earl (2010). *Quarterly*

- Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(702), 293-308.
- Tamsir, M., & Kumar, V. (2011). A semi-implicit finite-difference approach for two-dimensional coupled Burgers' equations. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(6), 46-51.
- Wu, C.-C., Lien, G.-Y., Chen, J.-H., & Zhang, F. (2010). Assimilation of tropical cyclone track and structure based on the ensemble Kalman filter (EnKF). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(12), 3806-3822.
- Xiao, Q., Zou, X., & Wang, B. (2000). Initialization and simulation of a landfalling hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Monthly weather review*, 128(7), 2252-2269. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2252:IASOAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2252:IASOAL>2.0.CO;2).

Conflicto de intereses: Declaramos no tener ningún conflicto de interés

Contribución de los autores: **Gestión de proyectos:** Albenis Pérez Alarcón. **Análisis Formal:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Conceptualización:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Conservación de datos:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón. **Redacción-primer redacción:** Onel Rodríguez Navarro. **Redacción-revisión y edición:** Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Investigación:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Metodología:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Obtención de financiación:** Albenis Pérez Alarcón. **Recursos:** Albenis Pérez Alarcón, Onel Rodríguez Navarro, Arlett Díaz Zurita. **Software:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Supervisión:** Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita. **Validación:** Onel Rodríguez Navarro. **Visualización:** Onel Rodríguez Navarro, Albenis Pérez Alarcón, Arlett Díaz Zurita

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/)