

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES METOCEÁNICAS EXTREMAS CAUSADAS POR HURACANES EN EL ATLÁNTICO TROPICAL

Marta RAMÍREZ-PÉREZ¹ y Melisa MENÉNDEZ GARCÍA¹

¹ *IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria,
Santander, Spain*

ramirezm@unican.es, menendezm@unican.es

RESUMEN

Los ciclones tropicales (CTs) se consideran uno de los peores desastres naturales, debido a los impactos devastadores que se producen como consecuencia de los fuertes vientos, las intensas lluvias, las condiciones de nivel del mar elevadas y los oleajes extremos. Mitigar la amenaza que suponen requiere de estudios específicos de evaluación de riesgo, que tengan en cuenta sus múltiples amenazas. Este estudio se centra en dos de ellas: los vientos y la contribución en la sobreelevación del nivel del mar asociados a huracanes históricos que afectaron a la región del Atlántico Oeste Tropical. Se analizan distintos métodos para reconstruir el campo de vientos asociados a dichos CTs, y se modela la correspondiente sobrelevación del nivel del mar. Los resultados se comparan con medidas instrumentales. Los resultados más similares a las medidas se han obtenido para los vientos del reanálisis ERA5 y el nivel del mar simulado a partir de dicho reanálisis. No obstante, ERA5 subestima significativamente las velocidades del viento máximas y no reproduce adecuadamente el perfil de viento radial asociado al ciclón. Respecto a los modelos paramétricos, los resultados varían entre los modelos explorados en función del evento y de la localización.

Palabras clave: huracán, ciclón tropical, viento, nivel del mar, marea meteorológica

ABSTRACT

Tropical cyclones (TCs) are one of the worst natural hazards, causing devastating impacts due to heavy rains, destructive winds, storm surge, high waves, etc. Mitigating the threat of TC requires a rigorous risk assessment, considering the multiple TC-related hazards. This study focuses on two of them: TC-associated wind and storm surge. In particular, we seek to assess different approaches for tropical cyclones wind field modelling and the derived storm surge. With this aim, both the wind field and the storm surge associated with four intense historical hurricanes on the Tropical Western Atlantic region are simulated and compared with in situ measurements. Results show that the ERA5 reanalysis outperforms compared to the three analyzed parametric wind models, although this dataset underestimates the maximum wind speed and does not reproduce properly the radial wind profile associated with the tropical cyclones. The reliability of data derived from parametric wind models vary depending on the event and location.

Key words: hurricane, tropical cyclone, wind, storm surge, extreme sea levels

1. INTRODUCCIÓN

Un ciclón tropical (CT) es un sistema de bajas presiones, que se origina sobre aguas tropicales o subtropicales (entre los 5° y los 30° de latitud norte/sur), ya que requieren de calor y humedad. Tienen un centro de circulación cerrado, en torno al cual los vientos rotan en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte (y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur). Se clasifican de acuerdo a la escala de Saffir/Simpson, que estima el potencial de daños del ciclón en función de la intensidad de sus vientos. Así, se distingue entre depresión tropical, tormenta tropical o huracán (de categoría 1 a 5). En el Pacífico Occidental se les denomina tifones.

Los CTs obtienen su energía de las diferencias verticales de temperatura, son más simétricos que los extra-tropicales y tienen un núcleo cálido. Las principales partes de un ciclón son el ojo, la pared del ojo y las bandas lluviosas (con tormentas eléctricas). El ojo es un área aproximadamente circular de buen tiempo, que presenta la menor presión en superficie y la mayor temperatura en la parte superior. En la pared del ojo se localizan los vientos en superficie más fuertes y presenta un diámetro en torno a 200-500 km, aunque puede alcanzar los 1000 km (Smith, 2006).

Los CTs se consideran uno de los desastres naturales más destructivos de la naturaleza, ya que provocan importantes impactos debido a los fuertes vientos, a las intensas precipitaciones, y a las condiciones extremas de nivel del mar en costa, causadas por la componente marea meteorológica y el oleaje.

Por ejemplo, el huracán Katrina (agosto de 2005), que tocó tierra con categoría 4 en Luisiana, causó múltiples inundaciones, pérdidas masivas de vidas (~1500) y desplazamiento de miles de personas, con un coste aproximado de 125 billones de dólares. Este huracán produjo una marea meteorológica de ~8.5 m en la Bahía de St. Louis y Pass Christian (en Misisipi), y velocidades de viento sostenidas de hasta 225 km/h, cerca de la isla de Grand (Luisiana).

Por estos motivos, existe un gran interés en determinar, de forma precisa, el campo de vientos asociado a los CTs, así como sus amenazas derivadas, a fin de desarrollar herramientas fiables de predicción y de alerta temprana, que permitan cuantificar los impactos, reducir los riesgos y proponer medidas de mitigación.

Existen distintas aproximaciones (con diverso grado de complejidad) para reconstruir el campo de viento asociado a los CTs: desde sencillos modelos paramétricos (ej., Holland (1980), Emanuel (2004)), modelos cinemáticos (ej., H*Wind (Powell et al., 1998) y IOKA (Cardone et al., 2007)) o modelos atmosféricos de meso-escala (ej., MM5 y WRF). Además, las bases de datos de reanálisis atmosférico son otra fuente de información muy valiosa, ya que tienen una cobertura espaciotemporal homogénea durante varias décadas (Thorne y Vose, 2010). Sin embargo, debido a su resolución espacial ($\geq 0.2^\circ$) tienden a subestimar significativamente la intensidad del ciclón (Karl et al., 2008; Hodges et al., 2017).

Debido a la baja frecuencia de los CTs, a menudo los registros históricos no son suficientes para estimar, de forma robusta, los valores extremos asociados a periodos de retorno altos de las variables meteoocéánicas. Por ello, es necesario recurrir a métodos estocásticos para generar una serie de eventos sintéticos de CTs. Además, otro aspecto clave hoy en día es el análisis de los efectos del cambio climático sobre los CTs, lo que implica la simulación de CTs futuros obtenidos a partir de Modelos Climáticos Globales (GCM). En ambos casos, se simulan un gran número de CTs y

las amenazas asociadas, lo que requiere de metodologías computacionalmente eficientes.

En este contexto, los modelos paramétricos de viento son una herramienta muy útil para abordar este tipo de estudios, ya que reconstruyen el perfil radial de viento y presión a partir de ecuaciones que se basan en un número limitado de parámetros del ciclón tropical (posición, intensidad, tamaño). En el caso de ciclones históricos, estos parámetros generalmente se obtienen de las bases de datos de Best Track (ej., IBTrACS, ATCF, SPEArTC, etc.). Dichas bases de datos constituyen las mejores estimaciones de los ciclones e incluyen datos de medidas satelitales, de aviones, boyas, etc.

La precisión y veracidad de los campos de viento reconstruidos van a condicionar los resultados en los análisis de amenazas y riesgos asociados a CTs, por lo que constituyen un elemento clave. Esto se debe a que dichos vientos se introducen como forzamiento en modelos numéricos avanzados para simular las condiciones asociadas de las dinámicas marinas (marea meteorológica y oleaje).

El rápido avance de las capacidades computacionales y la creciente disponibilidad de datos ha hecho que, en las últimas décadas, se desarrollen nuevos modelos y aproximaciones para simular los CTs y las amenazas asociadas.

Este estudio tiene como objetivo llevar a cabo un análisis de sensibilidad de algunos de los modelos más recientes y comúnmente utilizados para reconstruir el campo de viento asociado a CTs, así como analizar sus efectos en la marea meteorológica generada. Los resultados se comparan con bases de datos disponibles y medidas instrumentales a fin de determinar la pericia de cada uno de los métodos considerados. El estudio se centra en la región del Atlántico Oeste Tropical y analiza una serie de huracanes históricos de gran intensidad.

2. MÉTODOS

Esta sección describe los huracanes históricos analizados en este estudio, así como los distintos modelos para reconstruir los forzamientos atmosféricos considerados y los datos disponibles para su validación. Además, se presenta el modelo hidrodinámico empleado para caracterizar la marea meteorológica derivada de cada uno de dichos modelos.

2.1. Ciclones tropicales históricos

El estudio se centra en cuatro huracanes de categoría 4 o superior que han afectado a la región del Atlántico Oeste Tropical (Fig. 1).

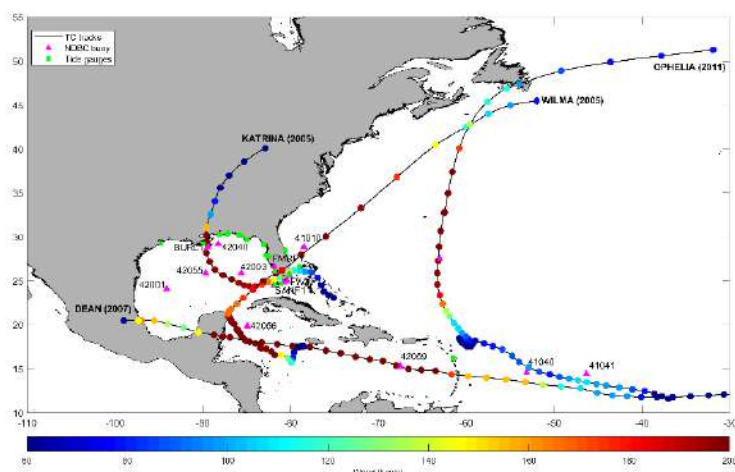


Fig. 1: Trayectoria de los 4 huracanes analizados, con los colores indicando la velocidad del viento máxima sostenida. Se muestra la localización de las boyas y mareógrafos utilizados.

La selección se ha hecho en función de la disponibilidad de información procedente de la base de datos de H*Wind, y de medidas instrumentales. Además, se han elegido CTs muy intensos (y que provocaron fuertes impactos), que presenten diferentes trayectorias (es decir, de este a oeste, de sur a norte, con un bucle, etc.).

La información sobre la posición, intensidad y tamaño de estos ciclones se obtiene de la base de datos de Best Track de IBTrACS (Knapp et al. 2018), que contiene datos, al menos, 6-h de cada uno de estos parámetros. La Tabla 1 muestra un resumen de las principales características de estos huracanes.

Huracán	Periodo del evento	Wmax (km/h)	Pmin (mbar)	Pérdidas
Katrina	23/08/2005 12:00 a 30/08/2005 12:00	278	902	\$125 billones en EEUU 1392 fallecidos
Wilma	15/10/2005 12:00 a 25/10/2005 18:00	296	882	\$21 billones en EEUU 33 fallecimientos directos
Dean	14/08/2007 18:00 a 23/08/2007 23:00	278	905	\$700 millones 32 fallecimientos directos
Ophelia	20/09/2011 0:00 a 03/10/2011 12:00	222	940	Sin daños registrados

Tabla 1: Características de los huracanes históricos analizados. Fuente: IBTrACS y Tropical Cyclone Reports.

2.2. Medidas instrumentales

Se han utilizado los datos instrumentales disponibles procedentes de boyas y mareógrafos con el objetivo de validar los datos simulados de viento y marea meteorológica. En concreto, se han seleccionado las boyas del National Data Buoy Center (NDBC) que se localizan cerca de la trayectoria o que se han visto afectadas

por los vientos extremos asociados a los huracanes analizados. Dichas boyas contienen información sobre la velocidad del viento promediado en 8 minutos y su dirección. La altura del anemómetro varía de una boya a otra y la medida se traslada a 10 m de altura mediante la relación propuesta por Mears et al. (2001):

$$W_{10} = \frac{\ln\left(\frac{10}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} * W$$

donde Z_0 es la longitud de rugosidad de la superficie (Peixoto and Oort, 1992; $Z_0 = 1.52 \cdot 10^{-4}$) y W es la velocidad del viento en m/s a la altura del anemómetro (Z) (en metros).

Respecto a los mareógrafos, se han descargado los datos de GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis), que contienen información horaria del nivel del mar.

2.3. Modelos para simular el campo de vientos

Este estudio analiza tres aproximaciones para estimar el campo espacial de vientos en superficie asociado a CTs: modelos paramétricos, datos procedentes de reanálisis globales y de modelos cinemáticos.

2.3.1. Modelos paramétricos de viento: entre los diferentes modelos paramétricos disponibles, el modelo de Holland (1980) es uno de los más utilizados y, por ello, a partir de éste se han propuesto diversas modificaciones y mejoras. Por esta razón, este estudio evalúa el modelo de Holland con las modificaciones propuestas por Fleming et al. (2008). Este modelo es conocido como el Modelo Dinámico de Holland. Sin embargo, varios estudios indican errores sistemáticos de este modelo, por lo que también se ha evaluado otro modelo que deriva del mismo. En particular, se analiza el perfil de viento continuo, definido por tramos, propuesto por Willoughby et al. (2006), el cual dio muy buenos resultados en estudios previos (por ejemplo, Ramsay et al., 2009). Por último, otro modelo cuyo uso está muy extendido, ya que se basa en los procesos físicos, es el propuesto por Emanuel (2004) y sus modificaciones. Este estudio se centra en el modelo de Chavas et al. (2015), que es uno de los modelos más recientemente desarrollados basado en el propuesto por Emanuel (2004) y por Emanuel y Rottuno (2011).

2.3.2. Bases de datos de reanálisis globales: ERA-5 es la última base de datos de reanálisis global generada por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, Dee et al., 2011). Como cualquier base de datos de reanálisis, ERA-5 combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. Cubre el periodo desde 1940 hasta el presente, con resolución horaria y a una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Las principales ventajas que presenta esta base de datos con respecto a su predecesor ERA-Interim son, entre otros aspectos, mayor resolución temporal y espacial y mejor representación de la troposfera y de los CTs. Los datos de ERA-5 están disponibles para descarga en: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>.

2.3.3. Modelos cinemáticos: la base de datos de H*Wind (*Real-time Hurricane Wind Analysis System*) contiene información sobre el campo espacial de viento en superficie

(velocidad promediada en 1 minuto y dirección), con una resolución ~6 horaria y sobre una malla regular de $8 \times 8^\circ$, centrada en el ojo del ciclón (Powell et al., 1998). Esta base de datos se genera a partir de la asimilación de medidas in situ, satelitales y de aviones. De acuerdo con Dietrich et al. (2018), H*Wind proporciona las mejores estimaciones del campo de viento asociado a CTs, ya que es la que mejor representa la estructura y asimetría del mismo. Por ello, este estudio utiliza esta información como referencia para validar los resultados de los modelos descritos en los apartados 2.3.1 y 2.3.2. Estos datos se descargan de: <https://www.rms.com/event-response/hwind/legacy-archive/storms>.

2.4. Modelo hidrodinámico para simulación de la marea meteorológica

El modelo ADCIRC es un modelo hidrodinámico bidimensional de última generación desarrollado por la Universidad de Carolina (Luetich et al., 1992). Resuelve las ecuaciones del movimiento (ecuaciones de continuidad y de conservación del momento) para un fluido en movimiento en una Tierra en rotación, utilizando las aproximaciones hidrostática y de Boussinesq, discretizadas en espacio utilizando el método de elementos finitos y en tiempo, el de diferencias finitas. Una de las principales ventajas de este modelo es que utiliza una malla de cálculo no estructurada, lo que permite aumentar la resolución en zonas de interés. Se utiliza en multitud de aplicaciones entre las que destaca que es el modelo usado por la USACE y por la FEMA (EEUU) para el análisis y predicción de la marea meteorológica e inundación asociadas a huracanes. Este modelo se ha forzado con los campos de viento y presión derivados de los distintos métodos descritos en el apartado 2.3.1 y 2.3.2.

3. RESULTADOS

Este apartado describe, por un lado, los resultados obtenidos de la reconstrucción del campo de viento y, por el otro, la marea meteorológica generada para los huracanes analizados. Los campos de viento modelados se comparan con las series temporales de la velocidad del viento medida por boyas y con los campos espaciales de la base de datos de H*Wind. Por su parte, la marea meteorológica modelada se compara con las medidas de los mareógrafos.

3.1. Viento

3.1.1 Series temporales en boyas

En general, todos los modelos paramétricos analizados simulan satisfactoriamente el pico de viento asociado al huracán. Los mejores resultados se obtienen con el reanálisis de ERA5, ya que captura no sólo el pico, sino todo el evento extremo y el comportamiento del viento fuera de dicho evento (Fig. 2). Estos resultados se observan de forma más clara en la Fig. 3, donde se muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos frente a los simulados, junto con las métricas de error.

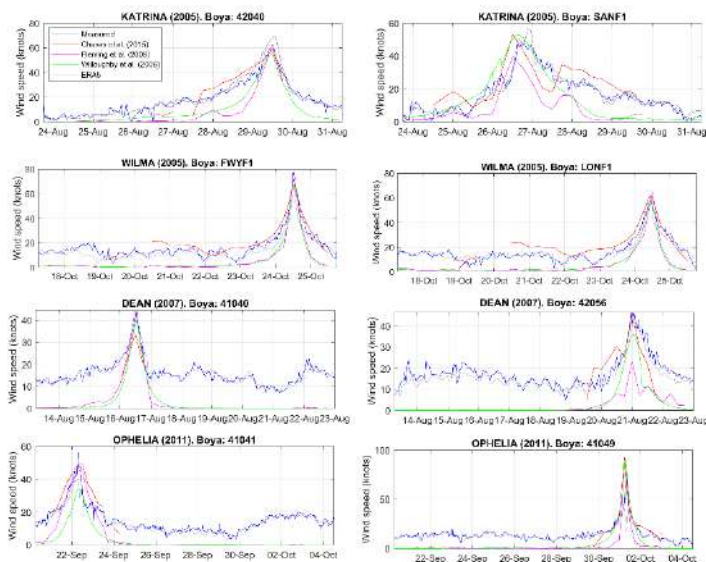


Fig. 2: Series temporales de velocidad del viento simuladas con los distintos modelos en las localizaciones de las boyas.

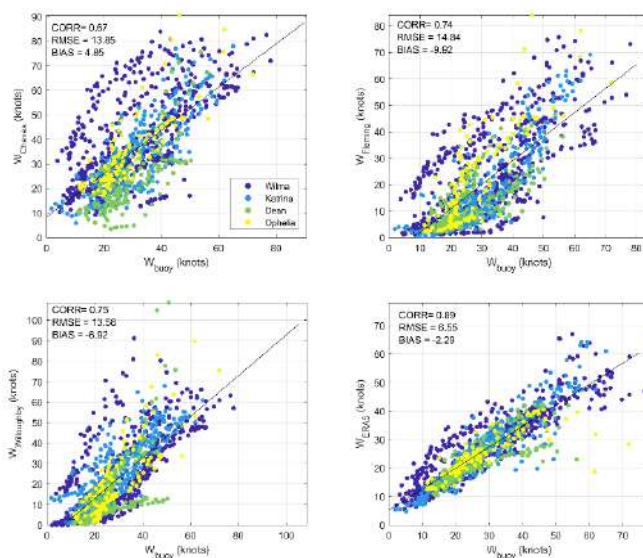


Fig. 3: Diagramas de dispersión de la velocidad del viento medida frente a la simulada durante el evento ciclónico, de acuerdo con los modelos utilizados. Los colores corresponden con cada uno de los huracanes analizados.

3.1.2 Campos espaciales

La comparación tanto de los campos espaciales (Fig. 4) como de los perfiles de viento radial (Fig. 5) utilizando los datos de H*Wind como referencia, ponen de manifiesto

que el reanálisis de ERA5 tiende a subestimar las velocidades del viento máximas y no es capaz de capturar adecuadamente el perfil radial de viento asociado al ciclón. Los modelos paramétricos, por su parte, representan satisfactoriamente el perfil radial de viento hasta una distancia de ~ 2 veces el radio de máximos vientos ($2 \cdot R_{max}$).

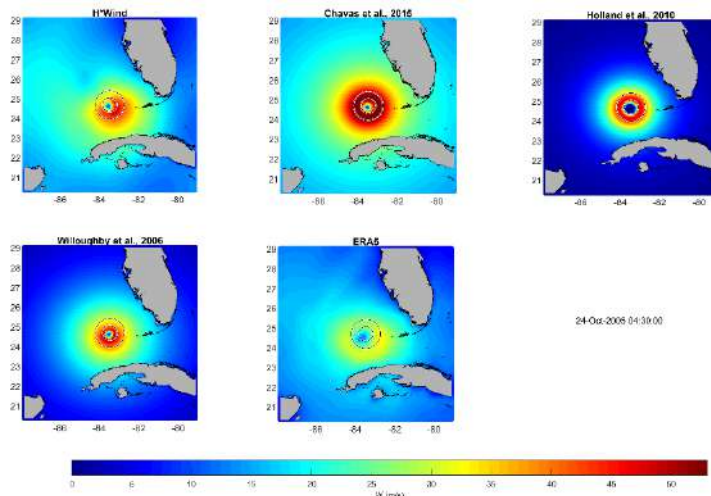


Fig. 4: Campos espaciales de la velocidad del viento asociada con el huracán Wilma el 24 de octubre de 2005 a las 04:30h, de acuerdo a la base de datos de H*Wind y a los 4 modelos analizados. Los círculos grises representan R_{max} (el radio de máximos vientos) y $2 \cdot R_{max}$.

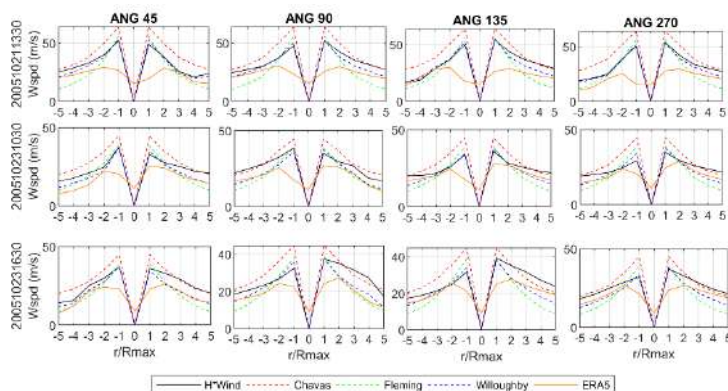


Fig. 5: Perfiles radiales de la velocidad del viento a 4 ángulos diferentes respecto a la dirección de avance del ciclón, reconstruidos en 3 instantes distintos durante el huracán Wilma (2005), con los modelos utilizados y con la base de datos de H*Wind.

3.2. Marea meteorológica

La simulación de la marea meteorológica asociada a los huracanes analizados se ha llevado a cabo utilizando, como forzamiento atmosférico, el campo de viento

generado de acuerdo a los cuatro modelos descritos. Los mejores resultados se han obtenido para el reanálisis de ERA5, a pesar de que tiende a subestimar ligeramente la marea meteorológica (Fig. 6).

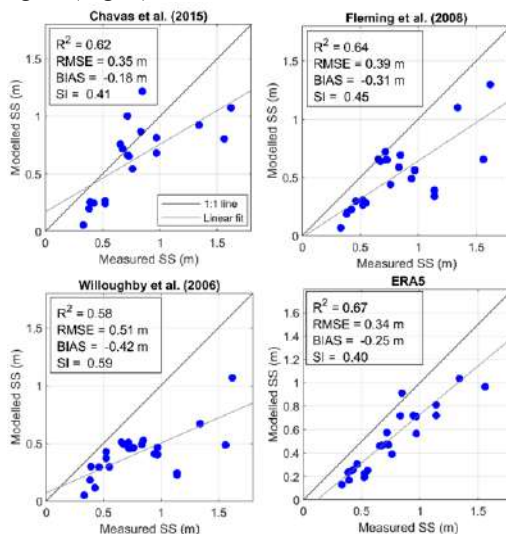


Fig. 6: Diagramas de dispersión de la marea meteorológica máxima (o storm surge (SS) en inglés) medida por los mareógrafos y modelada para los 4 huracanes analizados.

4. CONCLUSIONES

Reconstruir de forma precisa el campo de vientos asociado a CTs es un aspecto clave en los estudios de impactos y riesgos derivados de estos eventos. Por este motivo, este estudio se centra en comparar tres modelos paramétricos que reconstruyen el viento y los datos atmosféricos procedentes del reanálisis ERA5. Además, se simula la marea meteorológica resultante de las condiciones atmosféricas obtenidas para cada modelo. Se han analizado cuatro huracanes históricos especialmente dañinos que afectaron a la región del Atlántico Oeste Tropical. Los resultados indican que ERA5 tiende a subestimar las velocidades del viento máximas y no es capaz de reproducir adecuadamente el perfil radial de viento asociado a los huracanes, comparado con los modelos paramétricos. Sin embargo, al comparar con medidas in situ, los mejores resultados tanto de velocidad del viento como de marea meteorológica asociada se han obtenido con esta base de datos para los eventos analizados. Respecto a los modelos paramétricos, ninguno destaca frente a los demás, ya que los resultados obtenidos a partir de ellos varían significativamente en función del evento y de la localización.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen la financiación proporcionada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades para la elaboración de este estudio a través del proyecto “CycloMar” (PID2023-151200OB-I00).

REFERENCIAS

- Cardone, V. J., et al. (2007). OTC 18652: Hindcast of winds, waves and currents in northern Gulf of Mexico in Hurricanes Katrina (2005) and Rita (2005). Offshore Technology Conf., Houston.
- Chavas, D.R.; Lin, N.; Emanuel, K. A (2015). A model for the complete radial structure of the tropical cyclone wind field. Part I: Comparison with observed structure. *J. Atmos. Sci.*, 3647–3662.
- Dee, D.P., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597.
- Dietrich, J.C., Muhammad, A., et al. (2018). Sensitivity of storm surge predictions to atmospheric forcing during hurricane ISAAC. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 144, 04017035.
- Emanuel, K. (2004). Tropical cyclone energetics and structure. In *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*; Fedorovich, E., Rotunno, R., Stevens, B., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 165–192.
- Emanuel, K., and Rotunno, R. (2011). Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure, *J. Atmos. Sci.*, 68, 2236–2249.
- Fleming, J. G, Fulcher, C. W., Luetlich, R. A., et al. (2008). A Real Time Storm Surge Forecasting System using ADCIRC. *Proceedings of the International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, pp. 893–912.
- Hodges, K. and Cobb, A. (2017). How well are tropical cyclones represented in Reanalysis Datasets? *Journal of Climate*, Vol. 30, 5243–5264.
- Holland, G.J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, 108, 1212–1218.
- Knapp, K.R., et al. (2018). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Luetlich, R.A., Jr., Westerink, J.J., and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.
- Mears, C. A., et al. (2001). Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 to 1997, *J. Geophys. Res.*, 106(C6), 11719–11729.
- Peixoto, J.P., Oort, A.H.(1992) *Physics of climate*. American Institute of Physics, NY.
- Powell, M.D., Houston, S.H., et al. (1998). The HRD real-time hurricane wind analysis system. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 77, 53–64.
- Ramsay, H. A., Leslie, L. M. and Kepert, J. D. (2009). A high-resolution simulation of asymmetries in severe Southern Hemisphere TC Larry (2006). *Mon. Weather Rev.*, 137(12), 4171–4187.
- Willoughby, H.E., Darling, R.W.R, and Rahn, M.E. (2006). Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectionally continuous profiles. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1102–1120.