

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO DEL CLIMA DE OLEAJE PRODUCIDO POR CICLONES TROPICALES EN EL ATOLÓN DE MAJURO (REPÚBLICA DE LAS ISLAS MARSHALL)

AUTORA: Sara Ortega van Vloten

DIRECTORES: Fernando J. Méndez Incera, Laura Cagigal Gil

CONVOCATORIA: Octubre 2019

PALABRAS CLAVE: Ciclón tropical, oleaje, inundación, híbrido, vórtice, parametrización

El objetivo principal de este trabajo final de máster es construir un emulador del clima de oleaje producido por ciclones tropicales mediante modelización numérica, con el que obtener una estimación del régimen de clima extremal, lo cual tiene un interés práctico para su aplicación en estudios de evaluación del riesgo de inundación producido por estos fenómenos extremos.

Se van a utilizar dos bases de datos de ciclones tropicales. La primera es la base de datos global de IBTrACs que ha recopilado los mejores registros históricos de todo el mundo hasta la actualidad, proporcionando las variables características de la traza con intervalos de 6 horas. La segunda es la base de datos sintética generada por Nakajo et al. (2014) que reproduce la diversidad y frecuencia de las trazas. La principal ventaja es que permite trabajar con una gran cantidad de ciclones sintéticos, supliendo el limitado número de eventos históricos.

Por otra parte, dada la falta de datos instrumentales, se utilizará la base de datos de altura de ola obtenida por altimetría de satélite bajo el marco del proyecto Globwave de la ESA para realizar una validación cualitativa de la modelización numérica. Adicionalmente se ha utilizado información batimétrica elaborada por la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO) y el USGS (U.S. Geological Survey). El desarrollo del trabajo se ha aplicado a una zona suficientemente extensa alrededor del atolón de Majuro, la capital de la República de las Islas Marshall.

La traza de un ciclón tropical se caracteriza principalmente por las variables de longitud, latitud, presión mínima en el centro de baja presión, velocidad máxima de los vientos y la velocidad de traslación. Se plantea un modelo de parametrización de las trazas de los ciclones para simplificar el problema y poder representar las trazas que transcurren por el área de influencia de la zona de estudio con los parámetros: presión mínima, velocidad de traslación, ángulo de entrada y azimut.

Se ha desarrollado un método híbrido de “downscaling” (o regionalización) híbrido del clima de oleaje producido por ciclones tropicales, lo cual permitirá reducir en gran medida el esfuerzo computacional obteniendo resultados aceptables en un periodo de tiempo significativamente reducido. Para ello se ha aplicado el algoritmo de máxima disimilitud (MDA) para

seleccionar un subconjunto de las trazas parametrizadas equitativamente distribuidas en el espacio muestral de los datos de partida.

Los campos de viento asociados a los ciclones tropicales son parametrizados mediante el Modelo Dinámico de Holland basado en el modelo de vórtice y posteriormente adaptado por Fleming et al. (2008) para incluir la consideración de los cambios dinámicos de los parámetros del ciclón a lo largo de su traza. Los parámetros de entrada del modelo son: la velocidad de translación del ciclón, la velocidad máxima de los vientos a una altura de 10m, el radio de los vientos máximos y la presión mínima.

La modelización numérica se simula con el modelo SWAN en modo no estacionario, realizando la propagación del oleaje producido por los campos de viento inducidos por el paso del ciclón a lo largo de la traza. El dominio de cálculo es suficientemente grande para adaptarse a la escala del ciclón tropical, y ser capaz de reproducir su evolución durante un periodo del orden de días. Se configura un conjunto de cinco mallas anidadas de resoluciones entre 15km y 75m. Los resultados se almacenarán en diversos puntos situados alrededor del atolón de Majuro.

La ejecución del modelo numérico se realiza para los M casos seleccionados por el algoritmo de máxima disimilitud, cuyo número ($M=500$) se determinó de modo que se pudieran ejecutar el máximo número posible de casos con la primera malla de 15km, en el tiempo disponible para la obtención de resultados. La colaboración del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente ha sido clave por facilitar el uso de un ordenador de 8 procesadores.

De forma paralela se ha ejecutado el caso de un ciclón histórico (Paka, 1997) que cruzó a poca distancia del atolón de Majuro. Para este caso particular se ha simulado numéricamente la traza histórica con los campos de vientos parametrizados y todas las mallas anidadas.

Al tratar con atolones con porciones de tierra muy pequeñas la resolución de mallas demasiado gruesas no captan la batimetría de detalle y no resuelven correctamente el efecto sombra del perímetro del atolón de Majuro (tanto dentro como fuera de la laguna). Generalmente la altura de ola significativa y los periodos tienden a sobreestimarse con las primeras mallas. La malla de 250m mejora los resultados sensiblemente resolviendo este aspecto.

Respecto al mapa de altura de ola significativa, se comprueba que el grado de asimetría es mayor que la del campo de velocidades del viento. A la derecha del ciclón la dirección del viento y la dirección de propagación de la tormenta tienden a estar alineadas por lo que los vientos más intensos actúan sobre una misma región durante un periodo de tiempo, lo cual puede asimilarse a un fetch por acumulación de energía.

Con los datos de satélite de las fechas que se han simulado numéricamente se ha realizado una validación cualitativa de la altura de ola propagada, con la limitación del carácter intermitente de los datos de satélite. Efectivamente se distingue una zona que coincide con el paso del ciclón y registró alturas de ola extremas. Hay que recordar que la simulación numérica únicamente se ha alimentado de campos de viento parametrizados, sin considerar el aporte de las condiciones de

oleaje, que sí registraron los datos de satélite.

La reconstrucción de los M casos simulados numéricamente se realiza utilizando una técnica de interpolación basada en la función de base radial (RBF). Previamente se han sintetizado las series temporales de altura de ola, periodo y dirección propagados, en un conjunto de valores representativos del run-up máximo por onda infragravitatoria como un indicador del grado de inundación. La validación de la reconstrucción demuestra que M=500 casos no son suficientes para representar la diversa casuística de ciclones tropicales, ya que no se llega a alcanzar un nivel de estabilización del error.

Por último, se ha calculado el régimen de clima extremal de ciclones tropicales sintéticos e históricos en función del número medio de ciclones tropicales anuales. Puesto que la serie sintética cuenta con una gran cantidad de datos es posible obtener el régimen extremal de periodos de retorno muy elevados. La máxima altura de ola asociada al máximo run-up parece converger alrededor de 11m. El régimen de clima extremal asociado a los ciclones históricos tiene una tendencia muy parecida a la obtenida de la serie sintética.

Como novedad, el trabajo se ha realizado utilizando el lenguaje de programación Python.

Las principales conclusiones que se obtienen tras la finalización de este trabajo son:

- Se ha generado un metamodelo capaz de estimar las condiciones de oleaje (altura de ola, periodo y dirección) a partir de los parámetros geométricos, cinemáticos y dinámicos de un ciclón tropical.
- La metodología propuesta permite desarrollar una estimación aproximada del régimen de clima extremal de ciclones en la zona de estudio, lo cual es interesante de cara a su aplicación práctica en estudios de evaluación del riesgo.
- El número de M=500 casos simulados ha demostrado no ser suficiente para conseguir una reproducción representativa de la diversa casuística de los ciclones tropicales, ya que el error de la reconstrucción no alcanza niveles de estabilización. Se deduce que la complejidad introducida al tratar con fenómenos extremos, repercute en la necesidad de ampliar el número de casos.

Asimismo, pueden apuntarse una serie de líneas futuras de investigación en las que enfocar mejoras de la metodología:

- Incluir en la parametrización de la traza variables adicionales para caracterizar la variabilidad temporal de la intensidad del ciclón tropical, la cual viene definida principalmente por la presión mínima en el centro de baja presión del ciclón.
- Analizar la conveniencia de definir obstáculos en el modelo numérico para asegurar la representación correcta de islas y atolones cuando no se disponga de batimetría de detalle.
- Ampliar el número de casos seleccionados por máxima disimilitud y propagarlos con las mallas anidadas hasta la resolución de 250m para comprobar la sensibilidad del error de la serie reconstruida en función de la resolución de cálculo.

REFERENCIAS

- Camus et al. (2010). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering* 58 (2011), 453-462. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Camus et al. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58 (2011), 851-862. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Fleming et al. (2008). A real time storm surge forecasting system using ADCIRC. [http://doi.org/10.1061.40990\(324\)48](http://doi.org/10.1061.40990(324)48)
- Ford et al. (2018). Inundation of a low-lying urban atoll island: Majuro, Marshall Islands. *Natural Hazards*. <http://doi.org/10.1007/s11069-018-3183-5>
- Holland, G.J. (1980). An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, volume 108 (8), 1212-1218
- Knaff et al. (2006). Statistical Tropical Cyclones Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence. <http://doi.org/10.1175/WAF1026.1>
- Knaff et al. (2014). An Objective Satellite-Based Tropical Cyclone Size Climatology. *Journal of Climate*, 27(1988), 455–476. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00096.1>
- Knaff et al. (2015). Improved Tropical-Cyclone Flight-Level Wind Estimates Using Routine Infrared Satellite Reconnaissance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, February 2015 <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0112.1>
- Knapp et al. (2010). The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS). <http://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Nakajo et al. (2014). Global Stochastic Tropical Cyclone Model Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis. <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-08.1>
- Stockdon et al. (2005). Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering* 53 (2006) 573-588. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Tan, C. & Fang, W. (2018). Mapping the Wind Hazard of Global Tropical Cyclones with Parametric Wind Field Models by Considering the Effects of Local Factors. *Int J Disaster Risk Sci* (2018) 9:86-99. <http://doi.org/10.1007/s13753-018-0161-1>

ABSTRACT

TITLE: Wave climate modelling produced by tropical cyclones on the atoll of Majuro (Republic of Marshall Islands)

AUTHOR: Sara Ortega van Vloten

DIRECTORS: Fernando J. Méndez Incera, Laura Cagigal Gil

SUBMISSION DATE: October 2019

KEY WORDS: Tropical cyclone, wave, flooding, hybrid, vortex, parameterization

The main objective of this final thesis is to build up a wave climate emulator produced by tropical cyclones with the aid of numerical modelling, so that it will be possible to obtain an approximation of the extreme wave regime, which is of particular interest for practical application in studies concerned with flood risk assessment produced by these extreme phenomena.

Two tropical cyclone databases will be used. The first is the IBTrACs global database which has compiled the best historical records from around the world up to date, providing the characteristic variables of the trace at 6-hour intervals. The second is the synthetic database generated by Nakajo et al. (2014) that reproduces the diversity and frequency of the traces. Its main advantage is that it allows to work with a large number of traces, replacing the limited number of historical events.

On the other hand, given the lack of instrumental data, the wave height database obtained by satellite altimetry under the ESA Globwave project will be used to perform a qualitative validation of the numerical modelling. In addition, bathymetric information from the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) and the USGS (U.S. Geological Survey) have been used. The practical development of this thesis has been applied to a sufficiently large area around Majuro Atoll, the capital of the Republic of the Marshall Islands.

The trace of a tropical cyclone is mainly characterized by the variables of longitude, latitude, minimum pressure at the low-pressure center, maximum wind speed and translation speed. A parameterization model of the cyclone traces is proposed to simplify the problem and to be able to represent the traces that cross through the influence area of the study case with the following parameters: minimum pressure, translation speed, angle of entry and azimuth.

A hybrid method to downscale wave climate produced by tropical cyclones has been developed, which will allow to reduce to a great extent the computational effort obtaining reasonable results in a significantly reduced period of time. For this purpose, the maximum dissimilarity algorithm (MDA) has been applied to select a subset of the parameterized traces fairly

distributed in the sample of initial data.

The wind fields associated with tropical cyclones are parameterized using the Holland Dynamic Model based on the vortex model and subsequently adapted by Fleming et al. (2008) to include the dynamic changes of cyclone parameters along its trace. The input parameters of the model are: translation speed of the cyclone, maximum wind speed at a height of 10m, maximum wind radius and minimum pressure.

The numerical modelling is simulated with the SWAN model in non-stationary mode, performing the propagation of the waves produced by the wind fields induced by the crossing of the cyclone along the trace. The numerical domain is large enough to adapt to the scale of the tropical cyclone, and to be able to reproduce its evolution during a period of days. A set of five nested meshes with resolutions between 15km and 75m is defined. The results will be stored for several points located around the Majuro atoll.

The execution of the numerical model is performed for M cases selected by the algorithm of maximum dissimilarity, which number (M=500) was determined in order to be able to execute the maximum possible number of cases with the first mesh of 15km, bound to the little amount of time available to obtain results. The collaboration of the Department of Water and Environmental Sciences and Techniques has played a key role by facilitating the use of a computer with 8 processors.

Moreover, a historic cyclone (Paka, 1997) that crossed close to the Majuro atoll has been simulated as well. In this case the historical trace has been simulated numerically with the parameterized wind fields and using all five nested meshes.

Since atolls are very small portions of land, the resolution of too coarse meshes does not sufficiently capture high quality bathymetry and does not correctly resolve the shadow effect of the perimeter of the Majuro atoll (both inside and outside the lagoon). Generally, significant wave height and periods tend to be overestimated with the few first nested meshes. The 250m mesh improves the results significantly by sorting out this aspect.

With respect to the significant wave height map results, it is observed that the degree of asymmetry is greater than that of the wind field. To the right of the cyclone the direction of the wind and the direction of the storm propagation are more or less aligned so that the most intense winds remain on the same region for a period of time, which can be assimilated as a fetch by accumulation of energy.

A qualitative validation of the propagated wave height has been performed between the numerically propagated data and the satellite data. The precision of the latter is limited since the time series data is intermittent. An area that overlaps with the crossing of the cyclone where extreme wave heights were recorded has been identified. It should be remembered that the numerical simulation only considered parameterized wind fields, without taking into account the contribution of wave input, in contrast of satellite real data.

The reconstruction of M=500 numerically simulated cases is performed using an interpolation technique based on the radial base functions (RBF). Wave height, period and direction propagated time series were reduced into a set of representative values of the maximum run-up due to infragravity wave, as an indicator of the flooding extent. The validation of the reconstruction shows that M=500 cases are not enough to represent the diversity of tropical cyclones, since there is no consistent reduction of the error.

Finally, the extreme climate regime of synthetic and historical tropical cyclones has been calculated using the average number of annual tropical cyclones. Since the amount of data of synthetic cyclones is very large, it is possible to obtain the extreme regime for very high return periods. Maximum wave height associated with maximum run-up seems to converge approximately 11m. The extreme climate regime associated with historical cyclones has shown a similar pattern to that of the synthetic series.

The realization of this thesis has been done using Python programming language.

The main conclusions that are obtained after the completion of this work are:

- A metamodel capable of estimating wave conditions (wave height, period and direction) from the geometric, kinematic and dynamic parameters of a tropical cyclone has been generated.
- The proposed methodology makes it possible to develop a rough estimate of the extreme cyclone climate regime in the study area, which is interesting for practical application in risk assessment studies.
- The number of M=500 simulated cases has shown to be insufficient in order to obtain a representative reproduction of the diversity of tropical cyclones, since the reconstruction error does not reach stabilization levels. It can be inferred that the complexity introduced when dealing with extreme phenomena influences the need to increase the number of cases.

Furthermore, a series of future lines of research to focus on to improve the methodology are suggested:

- To include in the parameterization of the trace additional variables to characterize the temporal variability of the intensity of the tropical cyclone, which is defined mainly by the minimum pressure in the low-pressure center of the cyclone.
- To analyze the convenience of defining obstacles in the numerical model to ensure the correct representation of islands and atolls when detailed bathymetry is not available.
- To extend the number of cases selected by maximum dissimilarity and propagate them with all nested meshes up to a resolution of 250m to determine the sensitivity of the error of the reconstructed series depending on the numerical resolution.

REFERENCES

- Camus et al. (2010). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering* 58 (2011), 453-462. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Camus et al. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58 (2011), 851-862. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Fleming et al. (2008). A real time storm surge forecasting system using ADCIRC. [http://doi.org/10.1061.40990\(324\)48](http://doi.org/10.1061.40990(324)48)
- Ford et al. (2018). Inundation of a low-lying urban atoll island: Majuro, Marshall Islands. *Natural Hazards*. <http://doi.org/10.1007/s11069-018-3183-5>
- Holland, G.J. (1980). An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, volume 108 (8), 1212-1218
- Knaff et al. (2006). Statistical Tropical Cyclones Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence. <http://doi.org/10.1175/WAF1026.1>
- Knaff et al. (2014). An Objective Satellite-Based Tropical Cyclone Size Climatology. *Journal of Climate*, 27(1988), 455–476. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00096.1>
- Knaff et al. (2015). Improved Tropical-Cyclone Flight-Level Wind Estimates Using Routine Infrared Satellite Reconnaissance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, February 2015 <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0112.1>
- Knapp et al. (2010). The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS). <http://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Nakajo et al. (2014). Global Stochastic Tropical Cyclone Model Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis. <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-08.1>
- Stockdon et al. (2005). Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering* 53 (2006) 573-588. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Tan, C. & Fang, W. (2018). Mapping the Wind Hazard of Global Tropical Cyclones with Parametric Wind Field Models by Considering the Effects of Local Factors. *Int J Disaster Risk Sci* (2018) 9:86-99. <http://doi.org/10.1007/s13753-018-0161-1>