

ARTICULO ORIGINAL

Peligro por ciclones tropicales en la Zona Especial de Desarrollo del Mariel

Tropical cyclones hazard in Mariel's Special Development Zone

Maria de los Angeles Zamora Fernández^{1*}
Julia Azanza Ricardo²
Kenia Hernández Valdés¹

¹ Empresa Inversiones
GAMMA S.A..

² Instituto Superior de Tecnologías y
Ciencias Aplicadas.

Autor para correspondencia:
maryzamfer97@gmail.com

OPEN ACCESS

Distribuido bajo:
Creative Commons Atribución-
NoComercial 4.0 Internacional
(CC BY-NC 4.0)

Editor:
Ana C. Sanz Ochotorena
(FBIO-UH)

Recibido: 08.06.2023

Aceptado: 02.10.2023

Resumen

Las instalaciones industriales son vulnerables al impacto de los fenómenos naturales. La afectación a una instalación puede provocar grandes pérdidas económicas y desencadenar otros procesos que afecten la salud humana y generen contaminación ambiental. Para Cuba, los ciclones tropicales son uno de los más dañinos, por su recurrencia y su fuerza destructiva. Determinar la frecuencia e intensidad con la que pueden impactar sitios de importancia económica es vital para preparar adecuadamente las instalaciones y minimizar los daños. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar los ciclones tropicales que han afectado la Zona Especial de Desarrollo del Mariel, lugar donde se ubican más de 50 empresas de diferentes sectores económicos de gran importancia para el país. Para ello, se creó una herramienta informática que permite estudiar los ciclones tropicales que afectaron la zona de estudio en el período de 1851-2020, de acuerdo a su área de formación, intensidad, frecuencia y probabilidad de ocurrencia. Los resultados mostraron que la zona bajo estudio es altamente afectada por huracanes, especialmente de categoría 1 y 2, con trayectorias típicas de los meses de septiembre y octubre. Esta información permite optimizar la gestión del riesgo del territorio.

Palabras clave: ciclones tropicales, Cuba, probabilidad, peligro.

Abstract

Industrial facilities are vulnerable to the strike of natural phenomena. Their effects on these facilities can cause great economic losses and trigger other process that threat human health and contaminate the environment. Tropical cyclones are one of the most harmful natural phenomena to Cuba because of its recurrence and destructive force.

Determining the frequency and intensity with which they might affect important economic places, is vital in order for facilities to get adequately prepared and minimize damages. Therefore, the objective of this paper is to characterize tropical cyclones that have affected Mariel's Special Development Zone (ZEDM in Spanish), where are located more than 50 companies from different economic sectors with great significance to Cuba. It was created a tool that allows to study the tropical cyclones that have affected this area in the 1851-2020 period according to their formation area, intensity, frequency and probability of occurrence. Results shown that the studied area is highly affected by category 1 and 2 hurricanes, with September and October's average paths. This information is useful for optimizing the risk assessment in this area.

Keywords: tropical cyclones, Cuba, probability, hazard.

Introducción

Entre las amenazas más importantes a las que tiene que enfrentarse un país en el trópico, se encuentran los ciclones tropicales, los cuales han ocasionado cuantiosas pérdidas económicas, miles de muertes y millones de personas sin hogar (Krishnamurti *et al.*, 2013). Por su ubicación geográfica en la parte occidental del mar Caribe, Cuba está expuesta a diferentes peligros naturales, entre los que se destacan los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Dentro de ellos, los huracanes son los más dañinos, por su recurrencia y su fuerza destructiva (Batista, 2010).

Los huracanes entre sí tienen grandes diferencias, no solo en su intensidad, sino también en sus características estructurales. Además, el posible impacto de estos está estrechamente ligado a las características geográficas del territorio (Pérez, 2015), entre otros factores. Los meses de mayor actividad, trayectorias más probables y períodos de retorno también son diferentes de acuerdo a la ubicación geográfica. En Cuba, es conocido que la región occidental tiene mayor probabilidad de que la afecte uno de estos sistemas (Roura y Díaz, 2020).

Debido a la gran influencia de los ciclones tropicales en Cuba, se han realizado numerosos trabajos sobre ellos, centrándose tanto en la climatología (Coll y Pérez, 2021; Roura *et al.*, 2018) como en la mejora de herramientas para el pronóstico (Rodríguez *et al.*, 2022). De manera general, el elemento más estudiado de los ciclones tropicales son las inundaciones costeras por penetración del mar debido a la condición de insularidad (Mitrani *et al.*, 2019; Hidalgo y Mitrani, 2022). Sin embargo, aún es necesario ampliar el conocimiento sobre estos fenómenos para poder cuantificar y predecir mejor las afectaciones que pueden ocasionar a los diferentes sectores económicos.

La identificación del peligro, vulnerabilidad y riesgo para eventos como los ciclones tropicales en instalaciones requiere un tratamiento diferente al riesgo tecnológico, ya que dependen de varios factores, los cuales deben actuar integradamente para que se produzca un desastre (Batista, 2010). En ocasiones, las características de este tipo de fenómenos se pasan por alto a la hora de diseñar dichas instalaciones o, si se hace, no se cumple con los requerimientos de la región en la cual estará ubicada.

La Zona Especial de Desarrollo del Mariel (ZEDM) es una zona franca comercial e industrial donde se localizan los principales puertos de la región, en un área estratégica del tráfico comercial marítimo de mercancías (Gaceta Oficial de Cuba, 2019). Desde su creación en el 2013, se han ubicado más de 50 empresas con un monto de inversión comprometido de más de tres mil millones de dólares (sitio web oficial ZEDM), por lo que el impacto de un ciclón tropical podría provocar grandes daños económicos. Por tanto, se plantea como objetivo caracterizar el peligro al que se enfrenta la Zona Especial de Desarrollo del Mariel (ZEDM) ante el impacto de ciclones tropicales.

Materiales y métodos

Características generales del territorio

El territorio objeto de estudio es la Zona Especial de Desarrollo del Mariel (ZEDM), que se ha concebido

como una zona franca comercial e industrial. Se ubica en la provincia de Artemisa y ocupa un área total de 465.4 km², distribuidos en nueve sectores (del A al I). La zona es de carácter urbano preferentemente (Gaceta Oficial de Cuba, 2019). Está caracterizada por un relieve llano de terraza marina hacia el norte (cercano a la costa), y hacia el sur es ondulado con algunas elevaciones que se destacan como colinas de forma ovalada (Álvarez *et al.*, 2007).

La temperatura promedio anual en la zona de estudio es de 26 °C, la temperatura máxima es de 29 °C y la mínima de 24 °C. El mes más frío del año es enero y el más cálido agosto. El acumulado promedio anual de precipitaciones es de 720.8 mm. El mes de mayor acumulado de precipitaciones es septiembre, con aproximadamente 104 mm, y el de menor acumulado es diciembre con 29 mm. Con respecto al viento, predominan los de región este, con una velocidad promedio anual de 16.8 km/h. El mes de mayores valores de velocidad del viento es septiembre (19.1 km/h), y el menor, agosto, con 13.9 km/h (El clima y el tiempo promedio en todo el año en Mariel, s.f.).

Colecta de datos

Se utilizó la base de datos del Centro Nacional de Huracanes (NHC) de los Estados Unidos (Landsea y Franklin, 2013) para la región del Atlántico Norte en el período de 1851-2020. Esta base de datos está delimitada por comas, en formato de texto con información cada seis horas sobre la localización, viento máximo y presión central de cada uno de los ciclones tropicales. Para complementar la información también se utilizaron los reportes de ciclones tropicales del NHC (<https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2020&basin=atl>) y los resúmenes de temporada del Instituto de Meteorología de la República de Cuba (<http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/>).

Procesamiento de datos

Para la realización de este trabajo, se tomó como referencia el punto de latitud 22.9919°N y de longitud 82.7667°W a una altura de siete metros sobre el nivel del mar y se escogieron aquellos ciclones tropicales que transitaron en un área de 160 000 km² (Fig. 1). Con la ayuda del módulo de Python *hurdat2parser-v2.11* (<https://github.com/ksgwxfan/hurdat2parser>), y con modificaciones realizadas por la autora, se encontró la categoría máxima a la que llegó el sistema de acuerdo a la escala Saffir-Simpson (SS) y el viento máximo reportado. Además, se logró determinar la fecha por la que se trasladaron en el área de estudio, el área de formación, la categoría máxima, el viento máximo reportado, la distancia y la velocidad de traslación mientras estuvieron en el área de estudio, así como la trayectoria del sistema.

Se estudió la climatología de dichos sistemas de acuerdo al mes de ocurrencia y su intensidad. Además, se estudió la tendencia anual mediante la prueba Mann-Kendall utilizando el módulo de Python *pyMannKendall 1.4.1* (<https://github.com/mmhs013/pyMannKendall/>) elaborado por Hussain y Mahmud (2019).

Para el análisis de las características del viento provocado por los ciclones tropicales, se estimó la velocidad del viento en el punto de estudio para cada uno de los sistemas que llegaron a alcanzar categoría de huracán de acuerdo a la metodología explicada por Cardona *et al.* (2013). Para el caso de las lluvias intensas, se tomaron los datos de algunos acumulados de precipitaciones en 24 horas de las estaciones Casablanca (23.143°N, 82.341°W), Bahía Honda (22.933°N, 83.219°W), Bauta (22.982°N, 82.538°W) y un pluviómetro ubicado en la bahía del Mariel, obtenidos de los reportes del NHC y del INSMET. La información sobre las inundaciones costeras se tomó de Povea (2015) en el período de 1901-2010. Para cada uno de estos fenómenos (viento, lluvia e inundación costera), se analizaron las trayectorias de aquellos que se consideraron más fuertes y el mes de mayor ocurrencia.

Además, se calculó la probabilidad de ocurrencia y los períodos de retorno de los ciclones tropicales tanto por categoría como por número de fenómenos al año mediante la ley de Poisson (Roura *et al.*, 2018). Luego, se aplicó la expresión propuesta por Borgman (1963) para estimar el nivel de riesgo de que afecte uno de estos sistemas para diferentes períodos de vida útil de una instalación ubicada en el territorio (1).

$$R(\%)=1-(1-1/T)^t \quad (1)$$

R: nivel de riesgo en %; T: período de retorno de cada categoría de huracán; t: tiempo de vida útil de la instalación.

Resultados y discusión

Características de los ciclones tropicales en la zona de estudio

Durante el período 1851-2020 (170 años), por la zona bajo estudio, han transitado un total de 160 organismos ciclónicos tropicales y de ellos 97 alcanzaron la categoría de huracán a lo largo de todo su estadio evolutivo. Dentro del área de estudio, predominaron las tormentas tropicales y 66 de esos sistemas alcanzaron la

categoría de huracán (Fig. 2). Los huracanes intensos representaron, aproximadamente, la tercera parte del total, y solamente se ha registrado un huracán SS5 en 170 años: el huracán de octubre de 1924, también denominado como huracán Diez.

El mes de mayor frecuencia de azote por huracanes es octubre, seguido del mes de septiembre (Fig. 3). En estos dos meses, se acumulan cerca del 60 % de todos los huracanes que han afectado la región, convirtiéndose en los meses más peligrosos para la zona bajo estudio. En los meses de inicio y fin de la temporada, la afectación es baja, siendo julio el mes de menos afectaciones registrada en la provincia. Esto se corresponde con investigaciones realizadas en la región Occidental (Roura *et al.*, 2018; Marcelo y Rodríguez, 2020).

Entre las regiones ciclogénicas, el área del mar Caribe es la de mayor interés (Fig. 4), y en ella se produce una mayor frecuencia de formación de estos sistemas en el mes de octubre. Estos datos también se encontraron en estudios realizados para toda Cuba, donde además destacan el área oceánica de formación

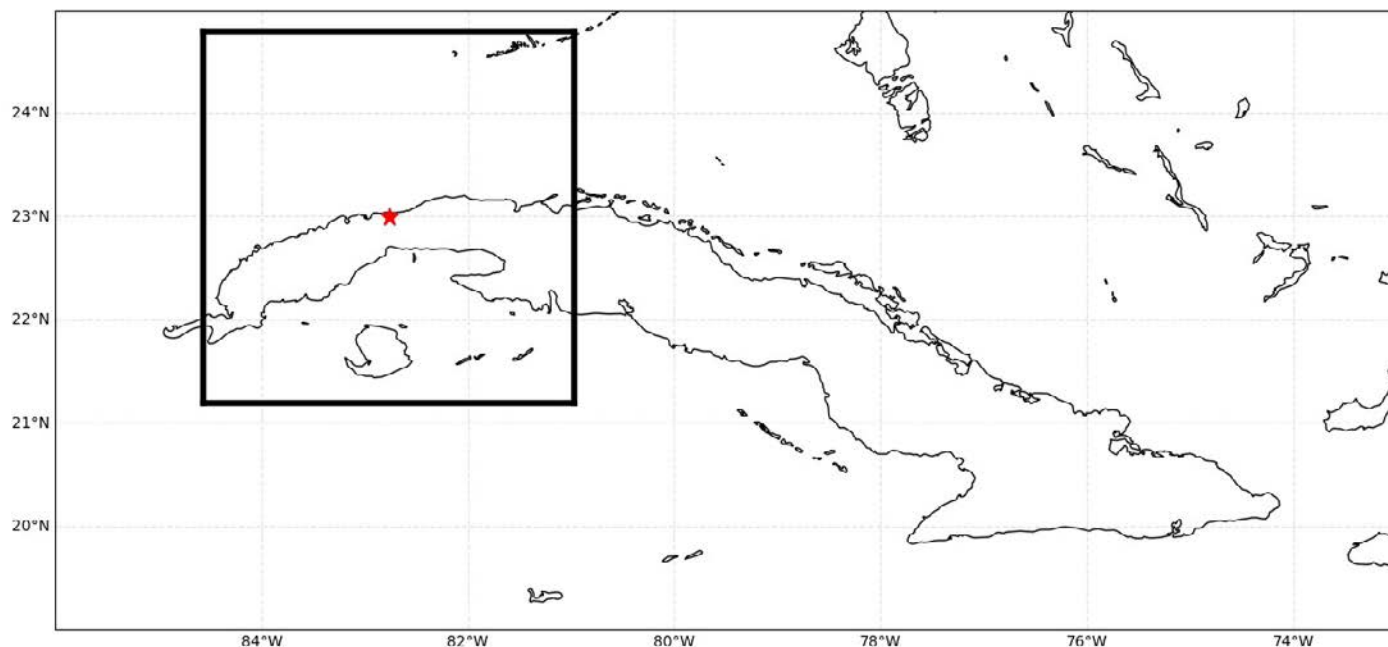


Fig. 1. Área de estudio. El recuadro en negro marca la zona de 160 000 km² y la estrella roja el punto de referencia para la ZEDM

con una componente de su movimiento pronunciada al oeste (Pérez, 2015)

Pérez (2015) explica que los huracanes del bimestre septiembre-octubre (Fig. 5) se desarrollan típicamente a partir de las ondas tropicales que se forman en la sabana africana durante la estación lluviosa. Se mueven hacia el Océano Atlántico y se transforman en ciclones tropicales cerca de las Islas de Cabo Verde, usualmente entre agosto y septiembre. La temporada de huracanes promedio tiene alrededor de dos huracanes de este tipo, los que suelen ser las tormentas más intensas de su temporada, ya que disponen de una amplia superficie oceánica abierta donde desarrollarse antes de encontrarse con tierra. En este periodo, el único huracán categoría 5 ocurrió en el mes de octubre. La trayectoria, normalmente, sigue la periferia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte y depende principalmente de la posición y fortaleza del mismo.

La velocidad promedio de traslación de los sistemas por el área de estudio fue de 12.6 km/h, inferior al promedio histórico calculado por la NOAA de 17.5 km/h para esa latitud. El valor mínimo fue encontrado para la tormenta de septiembre de 1919 (1.68 km/h), y el máximo fue el huracán Laura de agosto de 2020 (33.7 km/h), el cual pasó con categoría de tormenta tropical. El huracán que transitó a menor distancia fue el de agosto de 1856 (AL051856) con categoría 2 a una distancia de 13.7 km. Predominaron

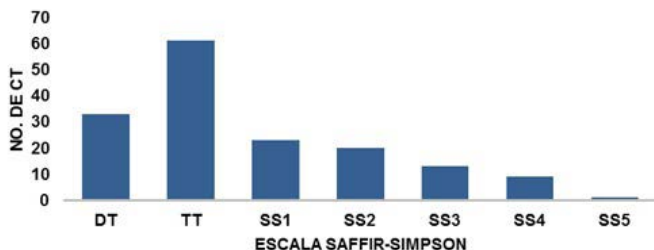


Fig. 2. Número y clasificación de ciclones tropicales de acuerdo a la escala Saffir-Simpson en el período de 1851-2020.

DT: Depresión tropical, TT: Tormenta Tropical, SS1: Huracán de categoría 1, SS2: Huracán de categoría 2, SS3: Huracán de categoría 3, SS4: Huracán de categoría 4 y SS5: Huracán de categoría 5.

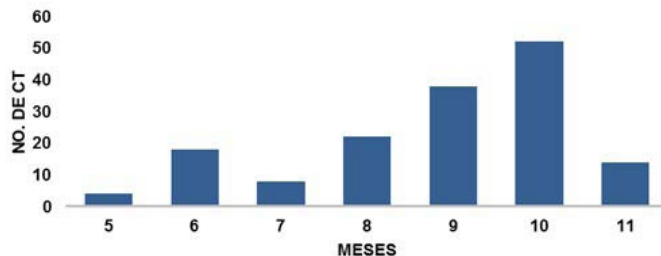


Fig. 3. Frecuencias mensuales de la afectación por ciclones tropicales en la zona de estudio

las trayectorias de los sistemas hacia el norte y el oeste, en correspondencia con lo expresado anteriormente sobre la trayectoria de los sistemas en los meses de septiembre y octubre.

Durante este período, los máximos anuales de ciclones tropicales ocurrieron en los años 1886 y 2005 con cinco casos cada uno, lo que se corresponde con la investigación de Roura *et al.* (2018) para toda Cuba. Sin embargo, a pesar de ser la temporada de 2020 la de mayor actividad histórica en la cuenca del Atlántico, solo dos de estos sistemas transitaron por el área de estudio. Por otra parte, la década de mayor actividad ciclónica fue la 2001-2010, con 17 sistemas y le sigue en importancia la de 1881-1890 con 16 casos. Valderá *et al.* (2021) señalaron que entre 2001 y 2020 Cuba fue afectada por 13 huracanes, de los cuales 10 (76.9 %) fueron de gran intensidad.

De manera general, no se evidencia una tendencia hacia el aumento del número de ciclones tropicales en el área de estudio (Fig. 6), lo cual se constata al realizar la prueba de Mann-Kendall la cual no es significativa. Sin embargo, Palacios y Ballester (2009) afirma que en toda la cuenca atlántica existe una tendencia al incremento de la actividad ciclónica, fundamentalmente de agosto a octubre, y específicamente en Cuba, a partir del 2001. Recientemente, Valderá *et al.* (2021) realizaron un análisis de la variabilidad de la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y Cuba durante el período 1851-2020. En este estudio,

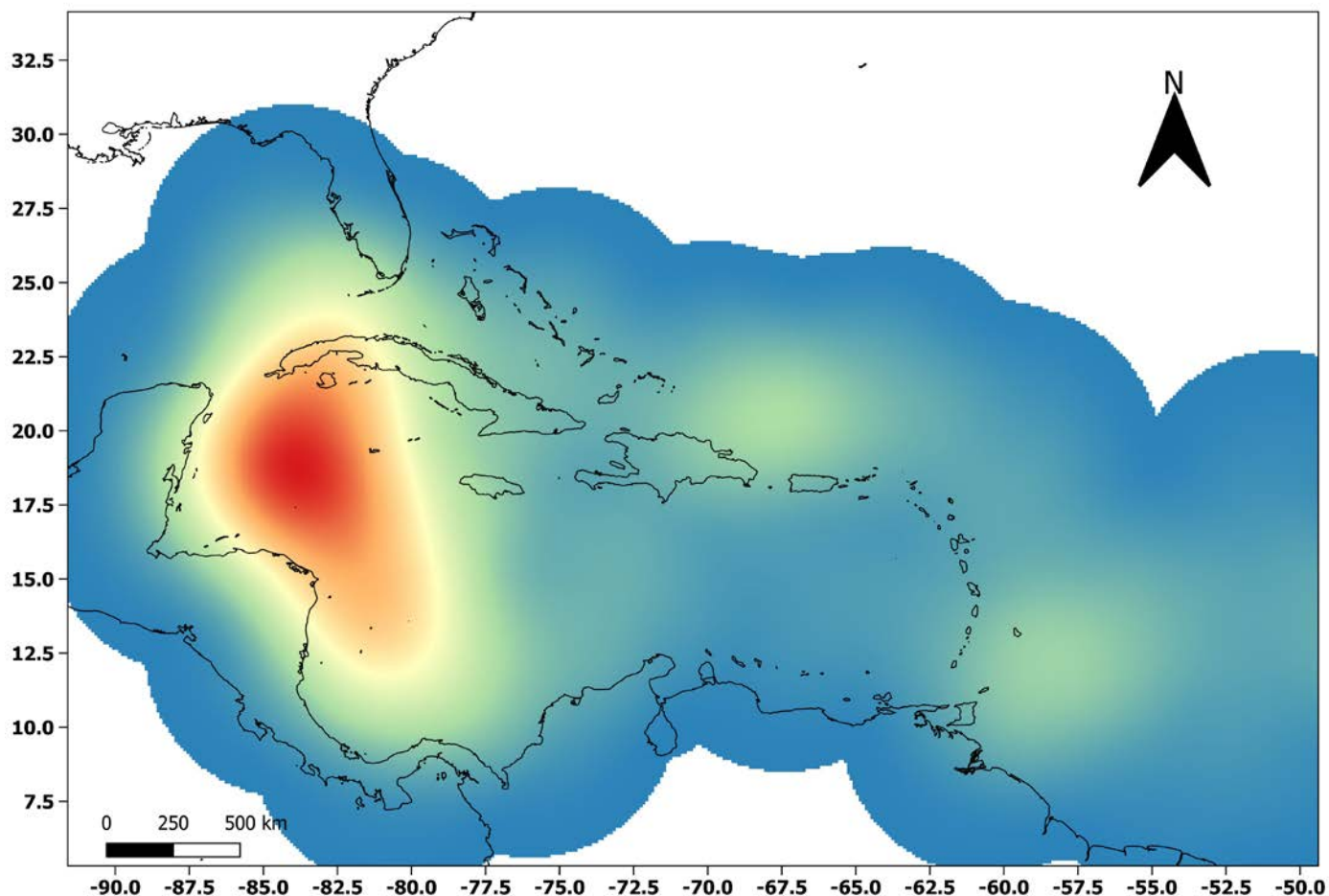


Fig. 4. Área de formación de ciclones tropicales que han afectado a la ZEDM

se encontró un aumento de la ciclogénesis tropical en el trimestre más activo (agosto-octubre), con más del 75 % de los casos.

Características del viento de los ciclones tropicales en la zona de estudio

En el área de estudio, según la metodología aplicada, solo seis sistemas han provocado vientos superiores a los 119 km/h (Fig. 7), dos de ellos después del 2020. De estos huracanes, el que provocó mayores velocidades del viento fue el Gustav (AL072008) de categoría 4 (Tabla 1), que además de ser el de mayor categoría, también afectó al territorio por el sector superior derecho en la dirección del desplazamiento. La estación

de Bahía Honda, cercana al territorio, reportó el día 31 de agosto a las 00 UTC una velocidad del viento sostenido de 140 km/h (Reporte del INSMET). En este caso, a pesar que fue el Charley (AL032004) el que pasó más cerca del territorio, no fue el de mayor velocidad del viento en los reportes debido a que en ese momento el área estuvo bajo la influencia del ojo del huracán y se encontraba hacia la izquierda del sistema.

Tal y como lo muestra la Fig. 7, la trayectoria más peligrosa para el área de estudio es cuando el sistema penetra por el sur del territorio y se mueve hacia el norte. Le sigue en importancia cuando se mueve por la costa norte de este a oeste. Estas trayectorias se corresponden

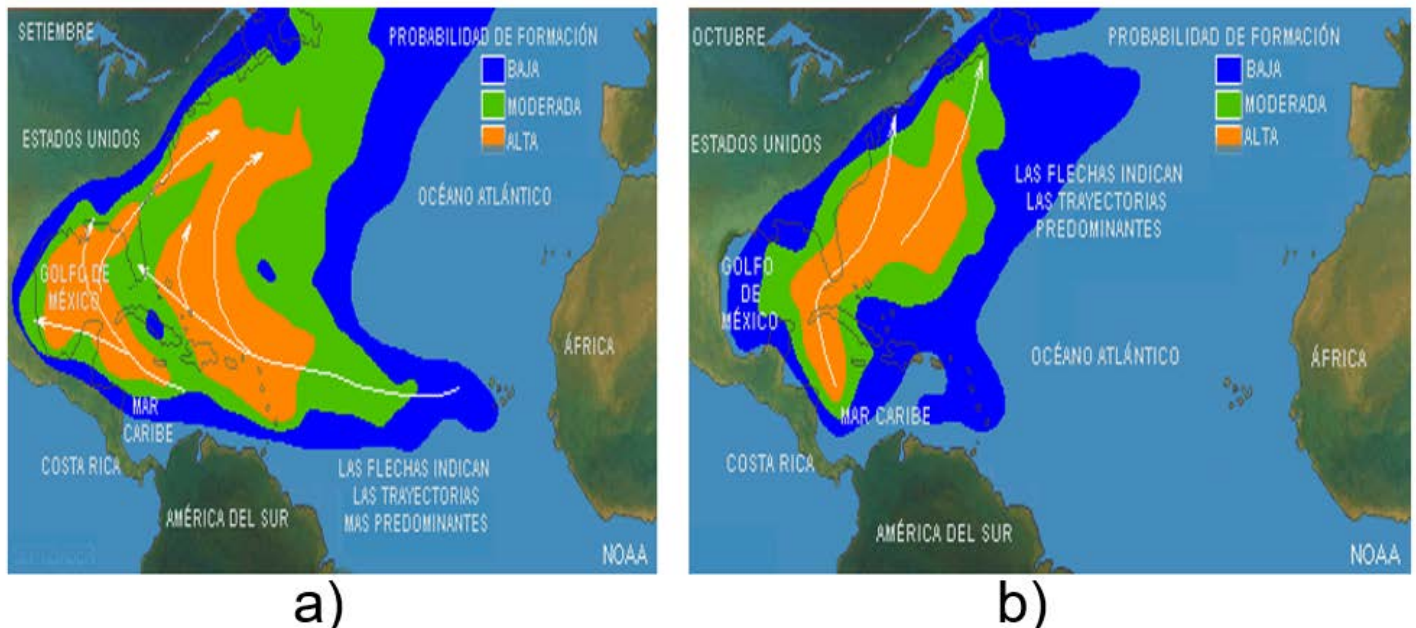


Fig. 5. Área de ciclogénesis y trayectoria más probable de un ciclón tropical en los meses de septiembre y octubre: a) septiembre y b) octubre (Pérez, 2015).

con la de los sistemas típicos de septiembre y octubre (Fig. 5), meses donde se encuentran el mayor número de afectación, lo que concuerda con los análisis realizados por Marcelo y Rodríguez (2020).

Por otra parte, el huracán de 1924, a pesar de ser el único que ha pasado por la zona de estudio con categoría 5, estuvo a una distancia de aproximadamente 134 km, demasiado alejado para que los vientos sobre

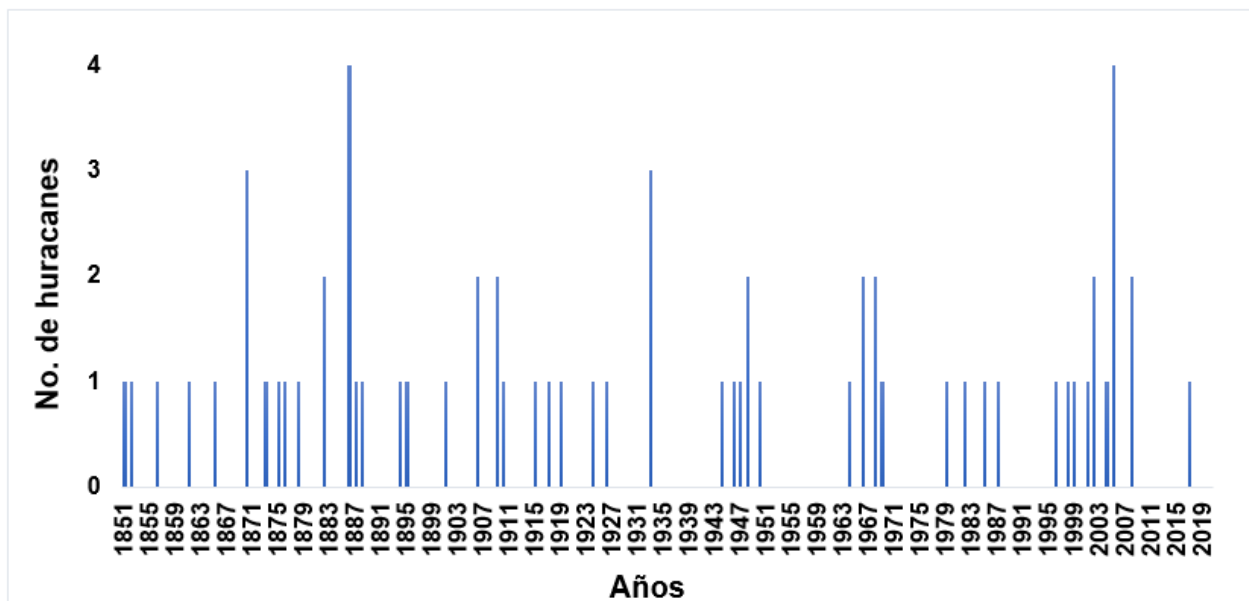


Fig. 6. Distribución anual de ciclones tropicales en el período de 1851-2020.

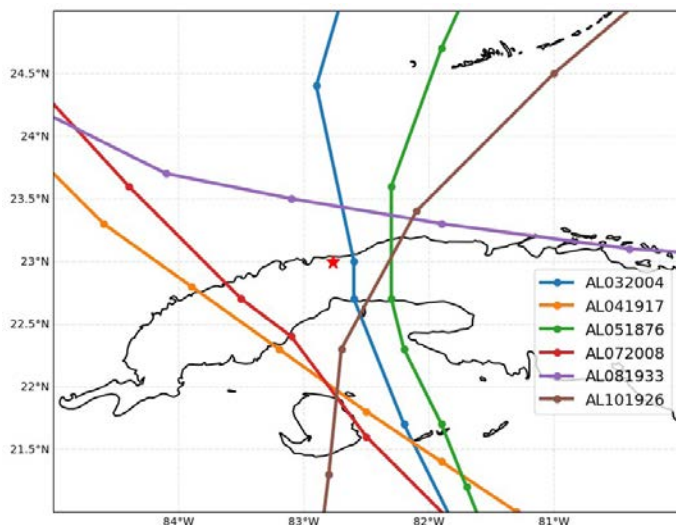


Fig. 7. Trayectorias de sistemas que provocaron valores de velocidad del viento superiores a los 119 km/h según la metodología de Cardona *et al.* (2013)

el área de estudio superaran los 119 km/h. Aun así, la velocidad de los vientos alcanzó valores de tormenta tropical.

Características de las lluvias intensas de ciclones tropicales en la zona de estudio

Analizando las trayectorias de algunos sistemas que provocaron lluvias intensas (Fig. 8), se puede observar que destacan aquellas donde el huracán penetra por la costa sur y atraviesa el territorio. Según los resultados de Planos y Limia (2004), las áreas donde se forman la

mayoría de los ciclones que afectan al país es el Caribe sur occidental y el océano Atlántico, de manera que la trayectoria predominante en el primer caso es norte o norte-noroeste y en el segundo este-oeste o este-noroeste. Como consecuencia de lo anterior, las mayores láminas promedio de los acumulados totales de lluvia ciclónica y de las láminas iguales, y superiores a 100 mm, se distribuyen predominantemente en la vertiente sur del país, con una visible influencia del relieve (Acevedo, 2016), sobre todo de los grandes sistemas montañosos, por lo que es comprensible que en el área de estudio no se encuentren muchos reportes de acumulado de precipitaciones superiores a los 200 mm. El mayor acumulado de precipitaciones en los puntos estudiados fue provocado por el huracán Ike en la estación de Bauta (214.9 mm/24h), el cual estuvo afectando el área de estudio por casi 24 horas. Resalta también el caso del huracán Charley, el cual provocó lluvias intensas de 149 mm en la bahía del Mariel.

Características de las inundaciones costeras por penetración del mar provocadas por ciclones tropicales en la zona de estudio

Según la cronología creada por Povea (2015), en el período de 1901-2010 en el área de estudio han ocurrido un total de 18 inundaciones costeras por penetración del mar provocadas por ciclones tropicales. De ellas, seis de intensidad moderada y doce fuertes. Teniendo

Tabla 1. Sistemas que provocaron valores de velocidad del viento superiores a los 119 km/h según la metodología de Cardona *et al.* (2013)

ATCFID	AL051876	AL041917	AL101926	AL081933	AL032004	AL072008
Nombre	Sin nombre	Sin nombre	Sin nombre	Sin nombre	Charley	Gustav
Fecha	1876-10-20	1917-09-26	1926-10-21	1933-09-02	2004-08-13	2008-08-31
Escala Saffir-Simpson (máxima)	3	4	4	5	4	4
Escala Saffir-Simpson (local)	3	4	4	3	3	4
Viento (km/h)	185.2	240.76	240.76	185.2	194.46	250.02
Viento local (km/h)	122.2	119.6	128.2	120.8	122.9	136.3
Velocidad de traslación (km/h)	7.61	12.72	14.93	17.38	5.56	8.82
Distancia (km)	57.80	88.86	77.24	65.97	17.09	74.17

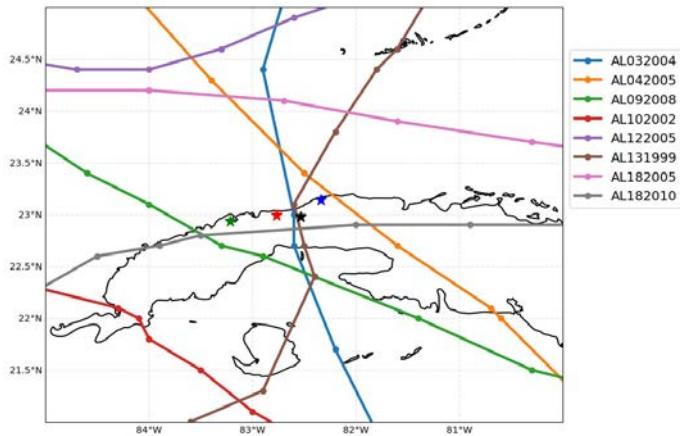


Fig. 8. Trayectorias de algunos sistemas que provocaron lluvias intensas en las estaciones meteorológicas: Casablanca (23.143°N, 82.341°W), Bahía Honda (22.933°N, 83.219°W), Bauta (22.982°N, 82.538°W) y un pluviómetro en la bahía del Mariel

en cuenta la clasificación de Hidalgo y Mitrani (2022), se puede asumir que estas han superado los 500 m de alcance tierra adentro.

De todos los sistemas estudiados, el que más cerca estuvo del área de estudio fue el Charley (17.1 km), el cual provocó una inundación de intensidad fuerte. La menor velocidad de traslación la tuvo el huracán de 1919 con solo 1.68 km/h provocando inundaciones moderadas. La zona del Mariel se encuentra entre los tramos costeros de Punta Gobernadora a península de

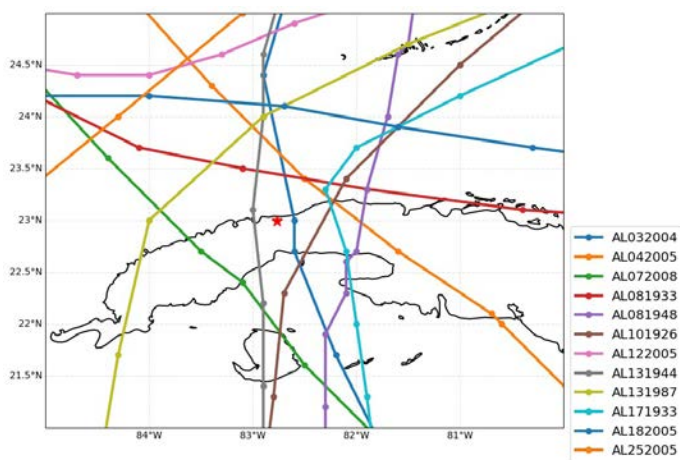


Fig. 9. Trayectorias de sistemas que provocaron inundaciones costeras fuertes en el período de 1901-2010

Hicacos, la cual presenta una plataforma estrecha con pendientes pronunciadas, siendo el rumbo más peligroso el noroeste (NW), el cual coincide con el fetch máximo (geográfico) (Hidalgo y Mitrani, 2022). Además, según los resultados de Salas y Pérez (2003), tiene peligro moderado de que ocurra una inundación costera provocada por fenómenos tropicales extremos como los ciclones tropicales. Los eventos más trascendentes fueron los ocurridos durante el Wilma (2005) y los huracanes de 1926 y 1944 (Hidalgo y Mitrani, 2022), los tres en el mes de octubre.

Se identificaron cuatro tipos de trayectorias que provocaron inundaciones costeras: un organismo que penetra en el golfo de México para luego recurrar; el organismo atraviesa las provincias habaneras de sur a norte; el organismo se desplaza de este a oeste en una trayectoria paralela a la costa norte occidental y el organismo desarrolla un movimiento errático sobre el golfo de México, lo cual coincide con lo encontrado por Povea (2015). En la Fig. 9, se muestran las trayectorias de los sistemas que provocaron inundaciones fuertes. La trayectoria más frecuente es en la que atraviesan las provincias habaneras de sur a norte, generando oleaje con peligro de inundaciones por penetraciones del mar por los vientos de sus sectores izquierdos, los cuales llegan a la costa desde rumbo noroeste, impactándola en dirección casi perpendicular (Povea, 2015).

Modelación estadística

Para el cálculo de probabilidades, se utilizó la Ley de Poisson de parámetro $\lambda = 0.94$ (media de ciclones tropicales por año). En la Tabla 2, se muestra la frecuencia, la probabilidad y los períodos de retorno para los sucesos $k=0$ (ningún ciclón tropical), $k \geq 1$ (al menos un ciclón tropical por año), $k \geq 2$ (al menos dos ciclones tropicales por año) y $k \geq 3$ (al menos tres ciclones tropicales por año). Por otra parte, en la Tabla 3 se muestra la probabilidad de afectación y el período de retorno para cada una de las categorías de la escala Saffir-Simpson. La mayor

Tabla 2. Ajuste de un modelo de Poisson a los datos de la variable aleatoria k que cuenta el número de huracanes por año. Período 1851-2020.

Clase (huracanes/año)	Frecuencia Observada	P(k)	Frecuencia Esperada	T(k)(años)
K=0	75	0.39	66.33	1.64
K=1	95	0.37	62.43	2.72
K=2	39	0.17	29.38	5.79
K=3	17	0.05	9.22	18.45

P (k) es la probabilidad de ocurrencia bajo la ley ajustada. T (k) es el período de retorno bajo la ley ajustada.

probabilidad de ocurrencia es para el suceso “al menos un ciclón tropical al año”, especialmente tormentas tropicales, mientras que son los huracanes de categoría 1 y 2 los más probables.

Es de destacar que el concepto de período de retorno no significa que existan ciclos en la actividad de huracanes sobre Cuba. Como otras condiciones climáticas extremas, los ciclones tropicales presentan grandes variaciones de diferentes escalas temporales, no solo en el número sino también en la intensidad

Tabla 3. Ajuste de un modelo de Poisson a los datos de la variable aleatoria según la escala Saffir-Simpson. Período 1851-2020

Clase (huracanes/año)	Frecuencia Observada	P	Frecuencia Esperada	T(años)
DT	33	0.16	27.18	6.26
TT	61	0.25	42.61	3.99
SS1	23	0.12	20.09	8.46
SS2	20	0.10	17.78	9.56
SS3	13	0.07	12.04	14.12
SS4	9	0.05	8.54	19.92
SS5	1	0.01	0.99	171.00

P es la probabilidad de ocurrencia bajo la ley ajustada. T es el período de retorno bajo la ley ajustada.

DT: Depresión tropical, TT: Tormenta Tropical, SS1: Huracán de categoría 1, SS2: Huracán de categoría 2, SS3: Huracán de categoría 3, SS4: Huracán de categoría 4 y SS5: Huracán de categoría 5.

y localización de los que se forman. Los cambios a gran escala que ocurren en la circulación oceánica y atmosférica ejercen una sustancial influencia en la actividad de cada temporada ciclónica del Atlántico Norte. Así se observan períodos de alta y baja actividad ciclónica, que se alternan a lo largo del tiempo (Roura y Díaz, 2020).

Luego de aplicar la fórmula de Borgman, se obtuvo que las instalaciones estaban expuestas al impacto de un ciclón tropical, especialmente a las tormentas tropicales y a los huracanes de categoría 1 y 2. El riesgo de que afecte un sistema de categoría 1 en la escala Saffir-Simpson en una instalación con un período de vida útil de 50 años es de casi el 100 %, y para una instalación con una vida útil de 15 años estará en el 80 % (Fig. 10), por lo que es necesario en el área realizar estudios de análisis de costo-beneficio y tomar medidas que puedan disminuir las afectaciones de este tipo de fenómeno.

Los huracanes son habitualmente asociados a considerables pérdidas económicas y dejan devastadores impactos que se pueden extender durante largos períodos de tiempo, especialmente en países en desarrollo (Bertinelli y Strobl, 2013). Además, estos sistemas representan un peligro adicional en el sector industrial donde pueden desencadenar la liberación de materiales dañinos para el medio ambiente (Krausmann y Mushtaq, 2008). Realizar una caracterización climática de los sistemas que han afectado al territorio y determinar los períodos de retorno es una parte muy importante del manejo del riesgo, con muchas aplicaciones (Emanuel and Jagger, 2010). La información obtenida en este trabajo puede ser utilizada para ayudar a la determinación de la vulnerabilidad en diferentes sectores, en la adopción de medidas para reducir los riesgos en las diferentes etapas de una instalación (planificación, construcción y producción) y en crear un sistema más apropiado para preparar a estas instalaciones industriales ante una posible afectación.

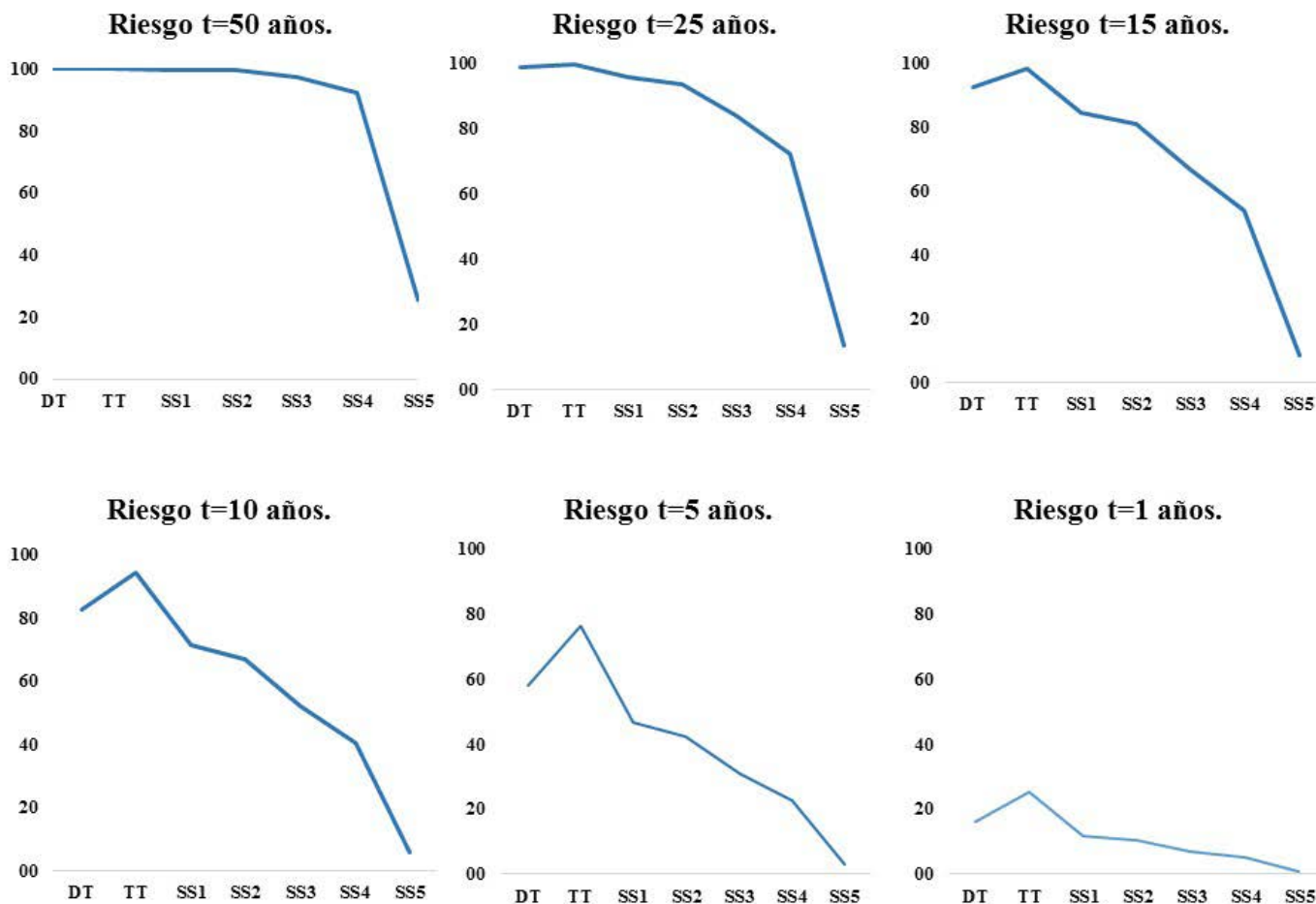


Fig. 10. Riesgo de afectación (%) de un ciclón tropical en una instalación para diferentes valores de vida útil

Conclusiones

En la Zona Especial de Desarrollo del Mariel en el período de 1851-2020 predominó la ocurrencia de tormentas tropicales, depresiones tropicales y huracanes de categoría 1 y 2 en la escala Saffir-Simpson, con una probabilidad del 37 % de que afecten al menos uno de cualquier categoría al año.

Se identificó que la mayor probabilidad de impacto de ciclones tropicales en la zona de estudio ocurre en los meses de septiembre y octubre, en especial, cuando el sistema penetra por la costa sur y sale por la costa norte.

Para la zona de estudio, es necesario tomar medidas para huracanes de categoría 1 y 2 que son por sus características los que tienen mayor riesgo de afectación y mayor probabilidad de ocasionar daños en el período de vida útil de una instalación. Los otros sistemas (con categoría superior a la 3), aunque son mucho más devastadores, el riesgo de que afecte una instalación con una vida útil de menos de 25 años es menor del 60 %, por lo que, se recomienda realizar un análisis costo-beneficio a la hora de implementar medidas adicionales de protección y aseguramiento que requieran grandes inversiones.

Recomendaciones

Extender los análisis de peligro a partir de esta metodología a otros sectores estratégicos de manera que se preparen mejor las instalaciones industriales ante una posible afectación por eventos meteorológicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos la disponibilidad de la base de datos HURDAT2 de manera gratuita.

Declaraciones

Contribuciones de los autores

Los autores han realizado las contribuciones siguientes al manuscrito: Conceptualización, MZ; Metodología, MZ, JA y KH; Validación, MZ, JA y KH; Investigación, MZ; Curación de datos, MZ; Escritura - Original" Preparación del borrador, MZ y JA; Escritura - Revisión y edición, MZ, JA y KH; Supervisión, MZ

Financiamiento

Esta investigación no contó con fuentes de financiamiento

Conflicto de intereses

No existen conflicto de intereses financieros o no financieros que declarar que sean relevantes para el contenido del manuscrito.

Comportamiento ético

No se utilizaron animales durante la realización del presente estudio.

Permisos de muestreo y otros permisos

No se necesitó solicitar permisos para la realización de esta investigación.

Referencias bibliográficas

Acevedo, S. (2016). Gone with the Wind: Estimating Hurricane Climate Change Costs in the Caribbean. IMF

Working Paper. Western Hemisphere Department. International Monetary Fund WP/16/199. 20 pp.

Álvarez Hernández, O.; Gómez Herrera, J. E.; Miranda Góngora, L.; Díaz Barrios, I. R. y Guerra Oliva, M. (2007). Mapa preliminar del Índice Sensibilidad Ambiental en el municipio Mariel, en la franja costera noroccidental de Cuba. En *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 2721-2727), Florianópolis, Brasil (21-26 abril de 2007), INPE.

Bertinelli, L and Strobl, E. (2013). Quantifying the Local Economic Growth Impact of Hurricane Strikes: An Analysis from Outer Space for the Caribbean. *J. Appl. Meteorol.*, 52, 1688-1697. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0258.1

Borgman, L. E. (1963). Risk criteria. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 89(3), 1-35.

Cardona, O.D., Bernal, G.A., Ordaz, M.G., Salgado, M.A., Singh, S.K, Mora, M.G., Yamín, L.E. y Barbat, A.H. (2013). *Modelación probabilista de riesgos naturales en el nivel global: el modelo global de riesgo. Modelos globales de terremoto y ciclón y evaluación de riesgo de desastres de los países para las amenazas de terremoto, ciclón e inundaciones*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – GAR 2013. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) & ITEC S.A.S. – INGENIAR LTDA. – EAI S.A.

Coll Hidalgo, P. y Pérez Alarcón, A. (2021). Climatología de los ciclones tropicales que tocaron tierra en Cuba entre 1980 y 2019. *Rev. Cub. de Met.*, (27), 4.

El clima y el tiempo promedio en todo el año en Mariel. (s.f.). Weatherspark. Consultado el 10 de agosto de 2022. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/16764/Clima-promedio-en-Mariel-Cuba-durante-todo-el-a%C3%B1o>.

Emanuel, K. and Jagger, T. (2010). On Estimating Hurricane Return Periods. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 49, 837-844. DOI: 10.1175/2009JAMC2236.1

Gaceta Oficial de Cuba. (2019). Edición ordinaria. No. 67. GOC-2019-784-O67. ISSN 1682-7511. <http://www.gacetaoficial.gob.cu>.

- Hidalgo Mayo, A. y Mitrani Arenal, I. (2022). Período de retorno de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano. *Ing. Hid. Amb.* (43), 1. ISSN 2788-6050, RNPS 2066.
- Hussain, M., y Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *J. open source softw.* (4), 39, 1556, <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- Krausmann, E. and Mushtaq, F. (2008). A qualitative Natch damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities. *Nat. Hazards*, 46, 179-197. DOI 10.1007/s11069-007-9203-5
- Krishnamurti, T.N.; Stefanova, L. y Misra, V. (2013). *Tropical Meteorology: An Introduction*. Springer Atmospheric Sciences. Springer Science+Business Media New York. New York, United States of America. ISSN 2194-5225 (electronic). DOI 10.1007/978-1-4614-7409-8_1.
- Landsea, C.W. y Franklin, J.L. (2013). Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Mon. Wea. Rev.* 141, 3576-3592.
- Marcelo García, G.C. y Rodríguez Alayón, A. (2020). Caracterización de los huracanes del Atlántico Norte que han afectado las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque entre 1791 y 2018. *Rev. Cub. de Met.* (26), 3. ISSN: 2664-0880.
- Mitrani-Arenal, I., Pérez-Bello, A., Cabrales-Infante, J., Povea-Pérez, Y., Hernández-González, Y.M. y Díaz-Rodríguez, O.O. (2019). Coastal flood forecast in Cuba, due to hurricanes, using a combination of numerical models. *Rev. Cub. de Met.*, (25), 2. ISSN: 0864-151X.
- Palacios Morales, J.R y Ballester Pérez, M. (2009). Variabilidad en la frecuencia de los huracanes del Caribe en octubre durante el período 1951-2005. *Rev. Cub. de Met.*, (15), 1 73-81.
- Pérez, R. (2015). Libro de Meteorología Tropical. 137 pp.
- Planos, E. y Limia Martínez, M.E. (2004). *Intensidad de las precipitaciones en Cuba. Proyecto 0801: Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en Cuba: Causas y características. Programa Ramal "Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial"*. Instituto de Meteorología (INSMET). Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/209805072>.
- Povea Pérez, Y. (2015). *Particularidades de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel*. (Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología). Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Universidad de La Habana. La Habana, Cuba.
- Rodríguez Navarro, O., Pérez Alarcón, A. y Díaz Zurita, A. (2022). Método de relocalización de vórtice para el sistema de pronóstico numérico de ciclones tropicales NTHF. *Rev. Cub. de Met.* (28), 2.
- Roura Pérez, P., Sistachs Vega, V., Vega, R. y Alpizar Tirzo, M. (2018). Caracterización estadística climatológica de huracanes en Cuba durante el periodo 1791-2016. *Rev. Cub. de Met.*, (24), 3, 304-312.
- Roura-Pérez, P. y Díaz-Sistachs, D. (2020). Metodología de viento máximo y probabilidad de afectación por huracanes en Cuba. *Rev. Cub. de Met.*, (26), 4 1-19. ISSN: 2664-0880.
- Salas, I. y Pérez Parrado, R. 2003. Modelo numérico para la surgencia que provocan los huracanes en la costa de Cuba (MONSAC3). *Rev. Cub. de Met.*, (10), 2 66-70.
- Valderá, N. F.; González, P. C. y Pérez, S. R. (2021). Variabilidad de la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y Cuba". In D. Hernández, Y. Rodríguez, , T. Gutiérrez, & L. Paz (Eds.), *XIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo 2021* (pp. 240-253). VII Congreso sobre Cambio Climático, La Habana: Instituto de Meteorología, ISBN: 978-959-300-210-3.
- Zona especial de desarrollo del Mariel (ZED Mariel). (2022). Sitio web: www.zedmariel.com. Consultado el 15/3/2022.

Como citar este artículo

Zamora Fernández, M. A., Azanza Ricardo, J., Hernández Valdés, K. (2023). Peligro por ciclones tropicales en la Zona Especial de Desarrollo del Mariel. *Rev. Invest. Mar.*, 43(2), 01-13.