

## **Índice Integrado de Peligro por Ciclones Tropicales: Sinergias entre trayectorias históricas, eventos ENOS y ciclos solares**

Leyani Izquierdo Barrera\* y Jorge Olivera Acosta.

Instituto de Geofísica y astronomía (IGA), Cuba. E-mail: leyaniib@gmail.com y yoyiga2010@gmail.com

\* Autor para correspondencia: [leyaniib@gmail.com](mailto:leyaniib@gmail.com)

Recibido: 21/08/2025	Aceptado: 16/11/2025
----------------------	----------------------

### **Resumen**

**Introducción:** La ausencia de un modelo integral que evalúe el peligro de ciclones tropicales, incorporando simultáneamente la variabilidad climática (ENOS), los ciclos solares y las trayectorias históricas (1851-2023), limita la precisión en la prevención de desastres y la planificación adaptativa en zonas costeras vulnerables del Caribe.

**Materiales y métodos:** Este estudio propone un Índice Integrado de Peligro que combina estos factores mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como MapInfo, SAGA y QGIS. Se aplicaron funciones de densidad gaussianas con ponderaciones específicas para generar un indicador robusto.

**Resultados:** Los resultados revelaron una mayor incidencia de ciclones durante períodos de La Niña y mínimos solares, en comparación con años de El Niño y máximos solares. Además, se identificó al Caribe occidental, particularmente el occidente cubano, como la zona más afectada.

**Conclusiones:** Este enfoque metodológico proporciona una base científica para mejorar la gestión de riesgos y la adaptación climática en regiones vulnerables, ofreciendo un marco de referencia para futuras investigaciones en el ámbito de los desastres naturales.

**Palabras clave:** ciclones tropicales, ciclos solares, eventos ENOS, índice de peligro, Sistemas de Información Geográfica.

## **Integrated Tropical Cyclone Hazard Index: Synergies between historical tracks, ENSO events, and solar cycles**

### **Abstract:**

**Introduction:** The absence of a comprehensive model assessing tropical cyclone hazard, simultaneously incorporating climate variability (ENSO), solar cycles, and historical trajectories (1851–2023), limits the accuracy of disaster prevention and adaptive planning in vulnerable coastal areas of the Caribbean.

**Materials and methods:** This study proposes an Integrated Hazard Index that combines these factors using Geographic Information System (GIS) tools such as MapInfo, SAGA, and QGIS. Gaussian density functions with specific weights were applied to generate a robust indicator.

**Results:** The results revealed a higher incidence of cyclones during periods of La Niña and solar minima, compared to years of El Niño and solar maxima. Furthermore, the western Caribbean, particularly western Cuba, was identified as the most affected area.

**Conclusions:** This methodological approach provides a scientific basis for improving risk management and climate adaptation in vulnerable regions, offering a reference framework for future research in the field of natural disasters.

**Keywords:** Geographic Information Systems, hazard index, ENSO events, solar cycles, tropical cyclones.

## 1. Introducción

Cuba posee un clima tropical estacionalmente húmedo, clasificado como Aw en el sistema de Köppen, típico de regiones con una estación seca y otra lluviosa bien definidas. La influencia marítima es determinante debido a su condición insular, rodeada por el Mar Caribe, el Océano Atlántico y el Golfo de México. Esto modera las temperaturas, evitando extremos térmicos, aunque la semicontinentalidad producto de la extensión territorial (109,884 km<sup>2</sup>) permite cierta variación en la amplitud térmica, especialmente en zonas interiores (Rivera, 2023).

La posición de la isla cubana en el Caribe la sitúa en la ruta principal de los ciclones tropicales que se forman en la cuenca atlántica. Los ciclones tropicales (CT) representan una de las principales amenazas hidrometeorológicas para el Caribe, particularmente para el territorio cubano, donde las condiciones geográficas y climáticas aumentan la exposición a sus impactos. En las últimas décadas, la intensificación de estos fenómenos ha sido objeto de atención científica, motivada por el aparente incremento en su frecuencia y severidad (*Generalidades de los Ciclones Tropicales*, 2025). En este contexto, la comunidad investigadora ha buscado comprender los factores que modulan su comportamiento.

Durante las últimas décadas, la comunidad científica internacional ha profundizado en el estudio de los factores que modulan el comportamiento de los CT. Se destaca el papel de la temperatura superficial del mar (TSM), la cizalladura vertical del viento, la humedad atmosférica y la inestabilidad convectiva. Sin embargo, ha emergido una línea de investigación que considera la influencia de fenómenos climáticos globales, como el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), y procesos astronómicos cíclicos, como los ciclos de actividad solar (AS).

El ENOS, por su naturaleza acoplada entre la atmósfera y el océano, induce variaciones significativas en la circulación general de la atmósfera tropical (*Información sobre ENSO: Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA*, 2025). Afecta, además, la distribución de la cizalladura del viento y modifica los patrones de precipitación y temperatura en diversas regiones del planeta, incluyendo el Atlántico tropical. Las fases cálidas (El Niño) tienden a generar condiciones desfavorables para la ciclogénesis en el Atlántico, mientras que las fases frías (La Niña) suelen crear entornos más propicios para la formación y fortalecimiento de ciclones (Doval et al., 2013).

Por otra parte, los ciclos solares se caracterizan por periodos de actividad máxima y mínima que afectan el número de manchas solares y la intensidad de la radiación electromagnética (*What Is the Solar Cycle? / NASA Space Place – NASA Science for Kids*, 2025). Se han asociado a alteraciones en la dinámica de la atmósfera superior y al comportamiento de la circulación general.

Investigaciones recientes han sugerido que los ciclos solares pueden incidir en el clima y en los patrones meteorológicos. La Irradiancia Solar Total afecta la cantidad de energía solar que llega a la Tierra lo que a su vez afecta la temperatura atmosférica. Además, los rayos cósmicos pueden influir en la formación de nubes al ionizar partículas atmosféricas, lo que a su vez interfiere en la reflectividad y la duración de las nubes (Ujoh, 2023).

Teniendo en cuenta lo anterior se considera como el **problema científico** a resolver durante este estudio: ¿Cómo la integración de variables climáticas (ENOS) y astronómicas (ciclos solares) mejora la precisión de los índices de peligro de ciclones tropicales, considerando su sinergia en la modulación de la actividad ciclónica en regiones como el Caribe?

Se tiene como **hipótesis**: La integración de trayectorias históricas de ciclones, las fases ENOS y los ciclos de actividad solar permitirá desarrollar un análisis de peligro con mayor precisión para predecir zonas y temporadas de alto riesgo ciclónico, comparado con métodos que estudian estas variables de forma independiente.

El **objetivo principal** de esta investigación es elaborar un índice de peligro por ciclones tropicales para la región de Cuba.

Se han propuesto nuevos planteamientos que pueden mejorar los índices de peligro ya existentes y además de ofrecer herramientas útiles para los sistemas de alerta temprana. Con este fin se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Desarrollar funciones de densidad mediante el análisis de series históricas por trayectorias.
2. Evaluar la influencia de las fases ENOS (El Niño/La Niña) en la frecuencia e intensidad de ciclones para la región del Caribe.
3. Evaluar la influencia de los ciclos solares en la frecuencia e intensidad de ciclones para la región del Caribe.
4. Evaluar la influencia de las combinaciones entre eventos ENOS y ciclos de actividad solar en la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales en el Caribe.
5. Cartografiar el índice de peligro y proponer cuáles son los lugares de mayor peligro esperado.

Para la redacción de la introducción se apoyó en el uso del programa de inteligencia artificial ChatGPT (Open AI, 2025).

## **2. Materiales y Métodos**

Para contribuir al cumplimiento de los objetivos se establecieron las **tareas** que se presentan a continuación:

1. Sincronizar series temporales de ENOS y actividad solar con eventos ciclónicos.
2. Análisis estadístico: elaboración de las funciones de densidad (Kernel), creación del índice de peligro ponderado asignando un peso según la intensidad de los ciclones tropicales (categorías).
3. Modelado espacial: Mapeo de trayectorias históricas y zonificación del comportamiento de las trayectorias de ciclones tropicales por eventos ENOS y ciclos solares.

### **2.1. Base de datos**

Para la confección del artículo se utilizaron los siguientes datos:

Para el análisis de los CT se empleó la base de datos del Archivo Internacional de Mejores Trayectorias para Gestión del Clima (IBTrACS). El formato de la misma es vectorial, además de que posee atributos de posición, presión central, velocidad del viento y categoría (escala Saffir-Simpson).

Por otro lado, para el estudio de El Niño-Oscilación del Sur, los años de ocurrencia por cada fase (Tabla 2-1) y el Índice Oceánico de El Niño (ONI) de NOAA para clasificar años en fases cálida ( $ONI \geq +0.5^{\circ}C$ ) y la fría ( $ONI \leq -0.5^{\circ}C$ ).

Se utilizaron, además, los años en que se desarrolló cada extremo de los ciclos solares (Tabla 1) y los datos de manchas solares (SILSO) y radiación UV (SDO/NASA) para identificar períodos de máxima (percentil  $\geq 75$ ) y mínima actividad solar (percentil  $\leq 25$ ).

Con respecto a la cartografía de Cuba, se manejó la línea costera y división político-administrativa (DPA) descargada de <https://www.geofabrik.de/>

**Tabla 1:** Períodos de eventos ENOS y CS.

Máximo solar	Mínimo solar	Niña	Niño
1859-1861	1855-1857	1903-1904	1902-1903
1870-1872	1866-1867	1906-1908	1905-1906
1883-1884	1876-1879	1909-1910	1911-1912
1893-1894	1880-1890	1916-1918	1913-1914
1905-1907	1900-1902	1924-1925	1918-1919
1917-1919	1911-1914	1928-1929	1923
1928-1929	1922-1924	1938-1939	1925-1926
1937-1939	1932-1934	1949-1951	1932
1947-1949	1943-1944	1954-1956	1939-1941
1957-1959	1953-1954	1964-1965	1946-1947
1968-1970	1964-1965	1970-1971	1951
1979-1981	1975-1976	1973-1976	1953
1989-1992	1985-1986	1983-1984	1957-1959
2000-2002	1995-1996	1984-1985	1963
2011-2012	2006-2009	1988-1989	1965-1966
2013-2014	2008-2009	1995-1996	1968-1970
2023-2024	2019-2020	1998-2001	1972-1973
-	-	2005-2006	1976-1977
-	-	2007-2008	1977-1978
-	-	2008-2009	1979-1980
-	-	2010-2011	1982-1983
-	-	2011-2012	1986-1988
-	-	2016-2017	1990-1993
-	-	2017-2018	1994-1995
-	-	2020-2023	1997-1998
-	-	-	2002-2003
-	-	-	2004-2005
-	-	-	2006-2007
-	-	-	2009-2010
-	-	-	2014-2016
-	-	-	2018-2019
-	-	-	2023-2024

**Fuentes:** (psl-noaa-gov.translate.google/enso/past\_events.html?\_x\_tr\_sl=en&\_x\_tr\_tl=es&\_x\_tr\_hl=es&\_x\_tr\_pto=tc, 2025) y (Ciclos solares históricos | Actividad solar, 2025)

## 2.2. Región de estudio

La región de estudio está compuesta por las cuencas del Atlántico Norte, el mar Caribe y el Golfo de México (Figura 1).



**Figura 1:** Representación general de la Región de Estudio.

### 2.3. Análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) definido como un modelo referido a un sistema de coordenadas terrestres y contruidos para satisfacer necesidades de información. Estos GIS permiten capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Buzai et al., 2013).

En la investigación se emplearon dos SIG, el Sistema de Análisis Geocientífico Automatizado (SAGA) y Quantum GIS (QGIS), (Tabla 2).

**Tabla 2:** Funciones a desarrollar con los SIG.

SIG empleados	SAGA	QGIS
Descripción	Ofrece un conjunto completo y creciente de métodos geocientíficos	Es un software libre y de código abierto
Función	Elaboración de funciones de densidad y del índice de peligro	Consultas a las bases de datos, determinación de pesos ponderados.
Versión	9.8	3.34.0

**Fuente:** elaboración propia

### 2.3.1. QGIS (1)

El trabajo se realizó de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se utilizó la herramienta Filtrar. Esto permitió hacer coincidir los años de afectación de los CT y los de ocurrencia de eventos ENOS y de CS, con lo que se obtuvieron otras bases que se guardaron con los nombres: ENOS, AENOS, MáxAS y MínAS. Estas últimas fueron interceptadas también, con el mismo procedimiento, para determinar el peligro por CT durante las combinaciones entre eventos ENOS y CS.
2. También con la herramienta Filtrar se dividió el conjunto de datos ciclónicos por categoría según la escala de Saffir-Sipson (Tabla 3). Se excluyeron de estas categorías las depresiones tropicales, pues se pretende trabajar con fuertes vientos, condición que se cumple solo para velocidades del viento superior a los 60 km/h.

**Tabla 3:** Escala de Saffir-Simpson para ciclones tropicales

Clasificación	Viento máximo sostenido (km/h)
Tormenta tropical	63-117
Categoría 1	118-153
Categoría 2	154-177
Categoría 3	178-209
Categoría 4	210-250
Categoría 5	>250

**Fuente:** (Generalidades de los Ciclones Tropicales, 2025).

### 2.3.2. SAGA (1)

Con las nuevas bases se generaron funciones de densidad (Kernel) con la herramienta Kernel Density Estimation. La elección del tipo de kernel y de los valores del radio del kernel y el tamaño de celda, se explica a continuación:

El radio del kernel (h), también llamado *bandwidth* o *ancho de banda*, controla cuán "lejos" se extiende el efecto de suavizado desde cada punto (Fotheringham, 2000). En SAGA suele definirse en las mismas unidades que el sistema de coordenadas del proyecto (metros, grados). Por otro, lado el radio de vientos máximos en un ciclón (RMW, Radius of Maximum Winds) define la distancia desde el ojo del huracán donde los vientos son más intensos (Fotheringham et al., 2000).

Dentro de los tipos de funciones de densidad que aparecen en la ventana se seleccionó el kernel gaussiano bajo el concepto de que las distribuciones del radio del mismo y de los vientos en un huracán siguen un perfil aproximadamente exponencial (Lin, 2012). Esto permitió ajustar el radio del kernel al RMW. Para cada categoría de huracán se utilizó un radio diferente, y así el suavizado reflejó la escala real del fenómeno.

El tamaño de celda define la resolución de la malla donde se evalúa la función de densidad. Una celda demasiado grande submuestra el kernel, pero una muy pequeña genera ruido por lo que es un valor crítico para equilibrar detalle y ruido. Este fue determinado mediante el concepto de que debe de ser entre 1/5 y 1/4 de la distancia promedio entre puntos de datos (Conrad et al., 2015).

Una vez obtenidos los kernels fueron normalizados con la herramienta Grid normalization. Esta operación se llevó a cabo para reducir incertidumbres.

### 2.3.3. QGIS (2)

En esta plataforma se empleó la herramienta Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La misma, se aplicó, para determinar los pesos ponderados para cada categoría de ciclón tropical. Se usaron matrices de comparación pareada y se validó a partir de la valoración de la relación de consistencia ( $CR < 0.1$ ). Una vez obtenidos los pesos se comprobó que la suma de todos es igual a 1, esto indica que el procedimiento fue correcto.

El AHP se basa en tres principios clave (Mendoza et al., 2019):

- Comparaciones pareadas (Tabla 4): Juicios de valor entre pares de elementos, con el uso de una escala numérica.
- Descomposición jerárquica (Tabla 5): División del problema en niveles (objetivo, criterios, subcriterios y alternativas).
- Síntesis de prioridades: Cálculo de vectores propios para determinar pesos relativos.

**Tabla 4:** Comparaciones pareadas a través de la escala de Saaty.

Valor	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Ambos criterios contribuyen igual.
3	Moderada importancia	Un criterio es ligeramente más relevante.
5	Fuerte importancia	Un criterio es esencialmente más importante.
7	Muy fuerte importancia	Un criterio domina claramente.
9	Importancia extrema	La evidencia favorece un criterio sin duda.
2,4,6,8	Valores intermedios	Para ajustes intermedios.

**Fuente:** (Mendoza et al., 2019)

**Tabla 5:** Juicios de criterio

Criterio	Categoría ciclón Tropical	Prioridad
1	Tormenta Tropical	6
2	Huracán 1	5
3	Huracán 2	4
4	Huracán 3	3
5	Huracán 4	2
6	Huracán 5	1

**Fuente:** elaboración propia.

Para la síntesis de prioridades se desarrolló la matriz de comparación pareada, donde los valores sobre la diagonal principal son introducidos por el usuario según su criterio. Con esto la herramienta obtiene automáticamente los pesos ponderados (Figura 2).

**STEP 2: Fill The Pairwise Matrix**

	Normalized C5	Normalized C4	Normalized C3	Normalized C2	Normalized C1	Normalized TT
Normalized C5	1	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Normalized C4		1	2.0	3.0	4.0	5.0
Normalized C3			1	2.0	3.0	4.0
Normalized C2				1	2.0	3.0
Normalized C1					1	2.0
Normalized TT						1

**AHP Indicators**

$\lambda = 6.123$

$CI = 0.025$

$CR = 0.02$

Buttons: Calculate, Load table..., Save table..., Back, Next, Cancel

**Figura 2:** Matriz de comparación.

**Fuente:** elaboración propia a partir de QGIS.

#### 2.3.4. SAGA (2)

Después de que todo el procedimiento anterior se volvió a SAGA para aplicar la herramienta Ordered Weighted Averaging (OWA). Owa es un operador de agregación multicriterio que permite combinar múltiples capas raster (criterios) en un análisis espacial (Malczewski & Rinner, 2015). En este se introdujeron los kernel density normalizados, en el orden de prioridad otorgado a cada elemento durante los juicios de criterio, y los pesos ponderados. Con todos estos datos el OWA generó el índice de peligro por CT para Cuba.

### 3. Resultados y discusión

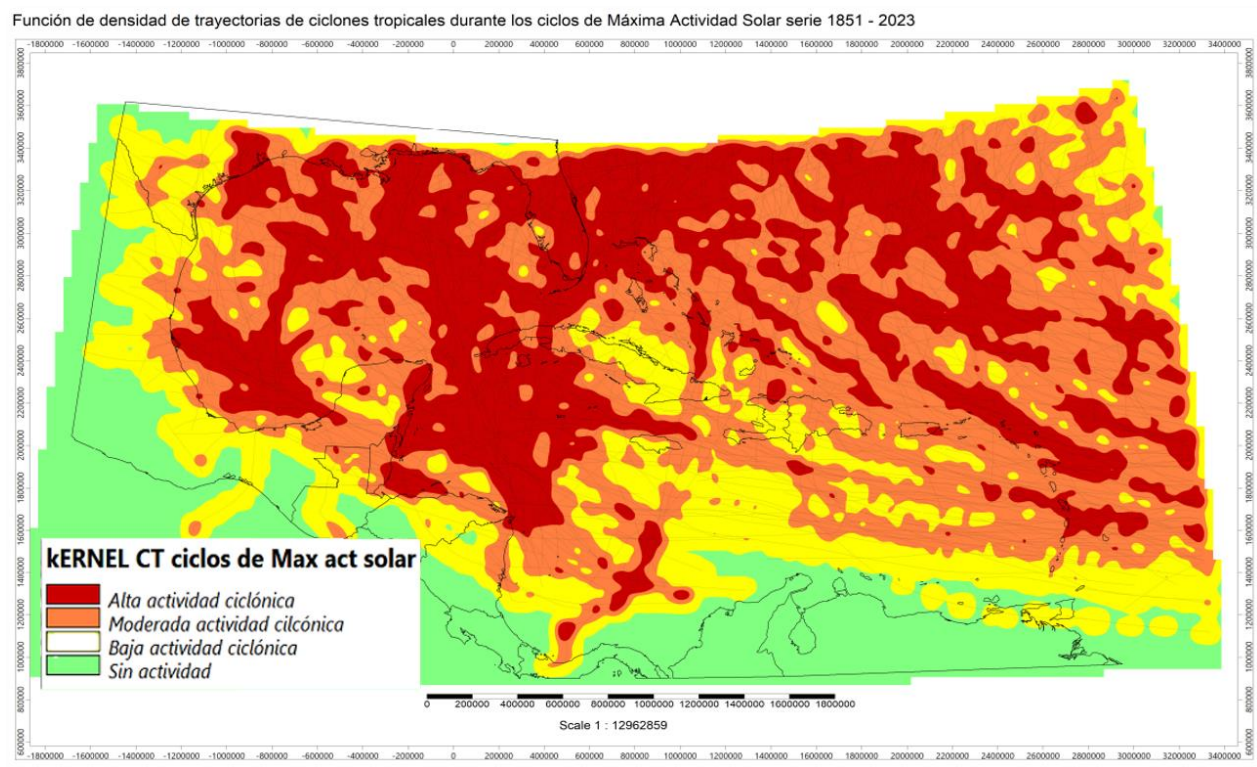
#### 3.1. Actividad Solar

##### 3.1.1. Ciclos de Máxima Actividad Solar.

En esta investigación, después de elaborados las funciones de densidad, se obtuvieron los siguientes resultados:



La (Figura 3) muestra la relación existente entre los ciclos de máxima actividad solar (MáxAS) con las trayectorias de los CT. Las rutas ciclónicas mostraron un comportamiento recto hacia el Mar Caribe con una menor curvatura hacia el norte, lo cual mantiene los ciclones en aguas cálidas por un tiempo prolongado.



**Figura 3:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Máxima actividad solar

**Fuente:** elaboración propia

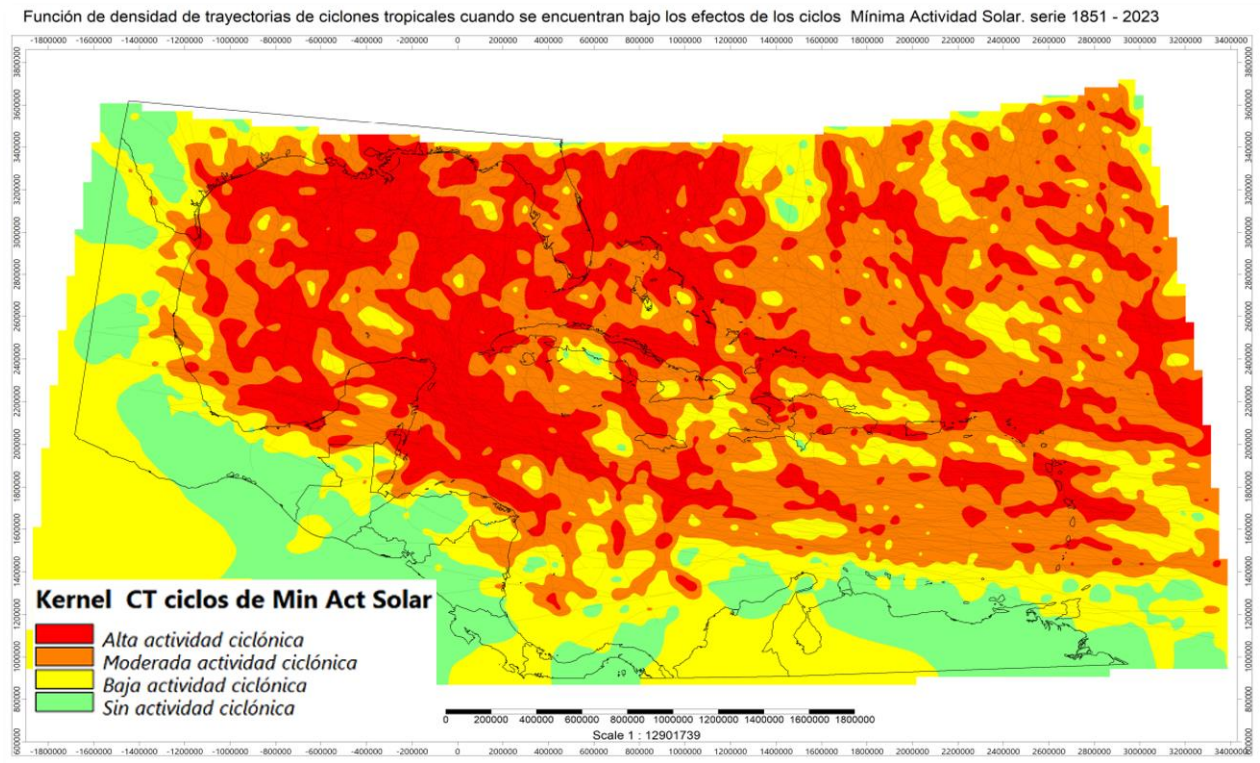
Los valores más altos de frecuencia se agrupan hacia la porción sur occidental del Mar Caribe y el Golfo de México y parte central del estrecho de la Florida. Por otro lado, la actividad mínima de ciclones tropicales va desde las provincias centrales de la Isla de Cuba hasta las Isla de la Española y Puerto Rico.

Para el territorio nacional la tendencia se puede describir de la siguiente forma:

- Las zonas de alto impacto: La Isla de la Juventud, Pinar del Río y La Habana, donde los huracanes que impactan esta zona suelen entrar desde el Caribe central o el Golfo de México.
- Las zonas impacto moderado: Matanzas, Artemisa, Mayabeque, Cienfuegos (donde los huracanes pasan cerca pero no siempre tocan tierra), el centro de Santiago de Cuba, el centro de Holguín y la Punta de Maisí.
- Las zonas de bajo impacto: desde las provincias centrales hasta Granma y el resto del territorio de Santiago de Cuba, Holguín y Guantánamo, donde los ciclones tienden a desviarse.

### 3.1.2. Ciclos de Mínima Actividad Solar.

Los ciclos de mínima actividad solar (MínAS) muestran una mayor influencia en la formación de ciclones tropicales en el Caribe, el Golfo de México y el Atlántico Norte.



**Figura 4:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Mínima actividad solar.

**Fuente:** elaboración propia

La Figura 4 evidencia el vínculo entre los MínAS y las trayectorias de los CT. Estas son propensas a desviarse hacia el noroeste. Los ciclones tienden a concentrarse en el Caribe occidental, donde la península de Yucatán es la zona de mayor impacto, y el Norte del Golfo de México. Por otro lado, las zonas de menor impacto se encuentran en el este del mar Caribe y en el norte de la cuenca atlántica.

En Cuba estos fenómenos muestran el siguiente comportamiento:

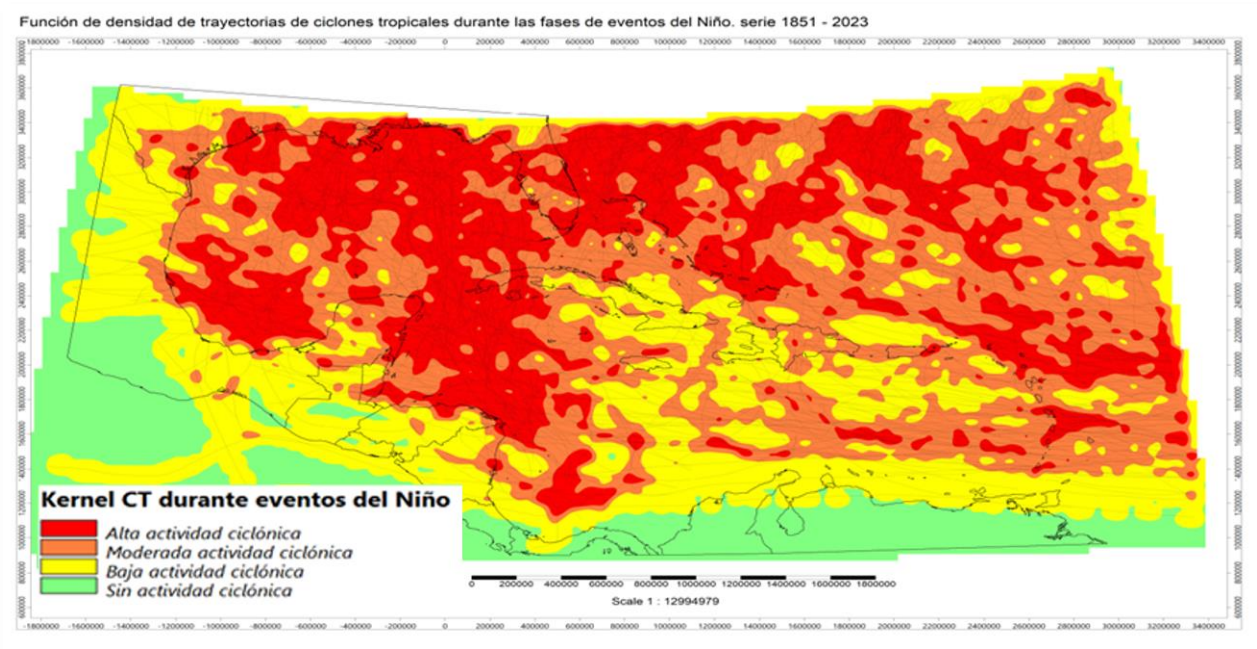
- Zonas de alto impacto: Provincia de Pinar del Río, Sancti Spíritus y el norte de Ciego de Ávila y Camagüey
- Zonas de impacto moderado: Artemisa, La Habana, Mayabeque, el norte de Matanzas y de Villa Clara, el sur de Camagüey, Las Tunas, Holguín, el norte y el sur de Granma, Santiago de Cuba y el occidente de Guantánamo.
- Zonas de bajo impacto: el sur de Matanzas, el norte de Cienfuegos, el centro de Granma y el oriente de Guantánamo.
- Sin actividad ciclónica: el sur de Cienfuegos.

Este mapa se muestra mucho más diversificado, con mayores valores del kernel en comparación con los MáxAS, sobre todo el territorio de Cuba y el Caribe occidental.

### 3.2. Eventos ENOS

#### 3.2.1. El Niño

Como se puede apreciar que durante la fase cálida las trayectorias se desplazan al este o al norte, evitando impactos directos con la superficie terrestre. Las mayores concentraciones de CT se encuentran en el oeste del mar Caribe, el norte del Golfo de México y al este de la península de la Florida. Las zonas menos afectadas pertenecen al caribe oriental y al este del Atlántico Norte. La Figura 5 muestra el análisis de densidad (Kernel) de las trayectorias de ciclones tropicales en el Caribe durante eventos de El Niño (1851-2023).



**Figura 5:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de eventos de El Niño

**Fuente:** elaboración propia

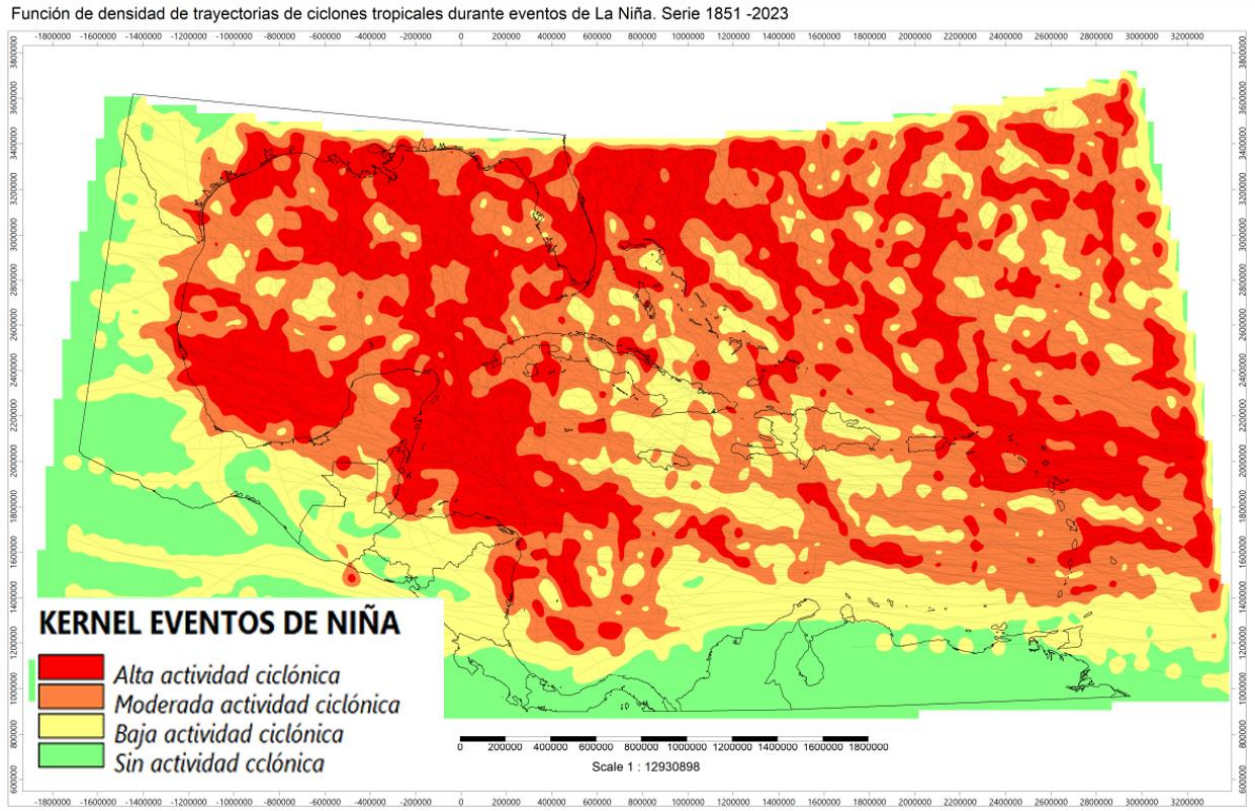
Para el territorio cubano, por otro lado, se evidencia la siguiente tendencia:

- Zonas de alto impacto: el occidente de Pinar del Río, La isla de la Juventud y Artemisa.
- Zonas de impacto moderado: La Habana, Mayabeque, el norte de Matanzas, de Villa Clara, de Sancti Spíritus y de Ciego de Ávila, el sur de Cienfuegos y de Camagüey y Punta de Maisí.
- Zonas de bajo impacto: el sur de Matanzas, de Villa Clara, de Sancti Spíritus y de Ciego de Ávila, el norte de Cienfuegos y de Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y el resto de Guantánamo.



### 3.2.2. La Niña

Los resultados del análisis de la relación de La Niña con las rutas ciclónicas se explican continuación.



**Figura 6:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de eventos de La Niña

**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 6 se muestra que la tendencia de las trayectorias ciclónicas es similar a la observada durante los MínAS, con una desviación hacia el noroeste. Durante la fase fría se encuentran más afectaciones en la Península de Yucatán, la Península, el Caribe occidental y Golfo de México. Los mínimos de actividad ciclónica se localizan en el oeste del mar Caribe y el norte de la cuenca atlántica.

El comportamiento en Cuba se describe a continuación:

- Zonas de alto impacto: el Cabo de San Antonio.
- Zonas de impacto moderado: desde Pinar del Río hasta Matanzas, con la inclusión de La Isla de la Juventud, el norte de las provincias centrales, el centro de Camagüey, el sur de Santiago de Cuba y el este de Guantánamo.
- Zonas de bajo impacto: el sur de las provincias centrales, los extremos este y oeste de Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, el norte de Santiago de Cuba y el occidente de Guantánamo

Se puede decir que bajo los efectos del evento La Niña, Cuba y el Caribe occidental enfrentan un riesgo elevado de ciclones tropicales intensos, en comparación con El Niño, con trayectorias que favorecen impactos directos.

La Tabla 6 muestra una comparación entre el comportamiento de este fenómeno y en de El Niño.

**Tabla 6.** Efectos de La Niña vs. Condiciones Neutrales/El Niño.

<b>Característica</b>	<b>Durante La Niña</b>	<b>Condiciones Neutrales/El Niño</b>
Frecuencia de ciclones	Aumento en el Caribe occidental y Golfo de México.	Más actividad en el Atlántico central y oriental.
Trayectorias típicas	Más hacia el oeste (ej. Cuba, Nicaragua, Belice Honduras, Golfo de México).	Más recurvas hacia el norte (ej. Bermudas, costa este de EE.UU.).
Intensidad	Ciclones más intensos por menor cizalladura y aguas cálidas.	Cizalladura más alta puede limitar intensidad (excepto en El Niño moderado).
Ejemplos históricos	Huracanes Mitch (1998), Michelle (2001), Ivan (2004).	Huracán Sandy (2012, El Niño neutro), Dorian (2019, condiciones neutras).
Impacto en Cuba	Alto riesgo de impactos directos y lluvias torrenciales.	Menor probabilidad, pero posibles tormentas recurrentes.

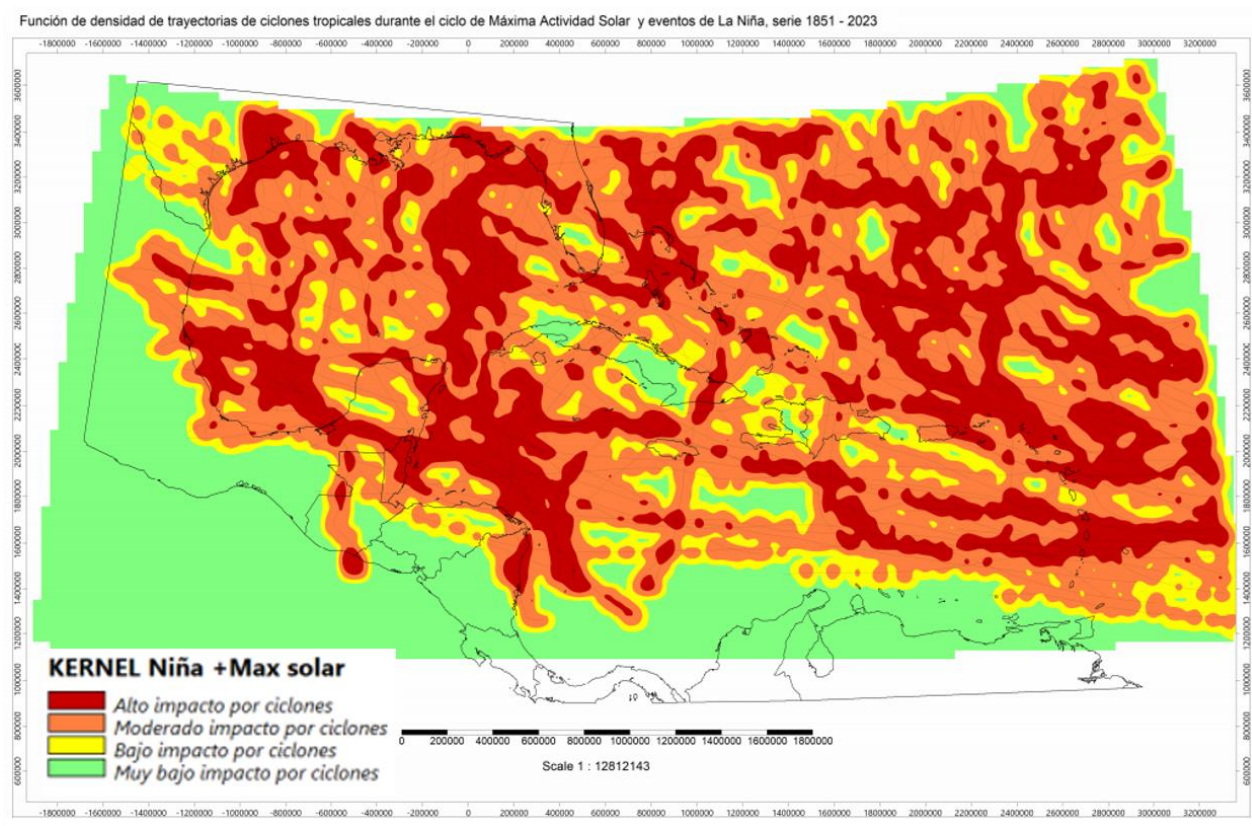
**Fuente:** elaboración propia.

### **3.3. Interacción de eventos ENOS con la actividad solar.**

#### **3.3.1. La Niña + Máximo de Actividad Solar.**

La correlación de La Niña con los MáxAS, de todas, es la que muestra menor actividad para Cuba espacialmente. En la Figura 7 se aprecia un máximo densidad en el Caribe occidental, con mínimos en el sur del mar Caribe. La afectación para el territorio nacional se describe de la siguiente forma:

- Zonas de alto impacto: Santiago de Cuba, Holguín y el Sur de Cienfuegos.
- Zonas de impacto moderado: Pinar del Río, La Isla de la Juventud, el este de Matanzas, el norte de Cienfuegos y Ciego de Ávila la afectación.
- Zonas sin actividad: La Habana, Artemisa, Mayabeque, el oeste de Matanzas y desde la provincia de Sancti Spíritus hasta Granma.



**Figura 7:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Máxima actividad solar y eventos de La Niña

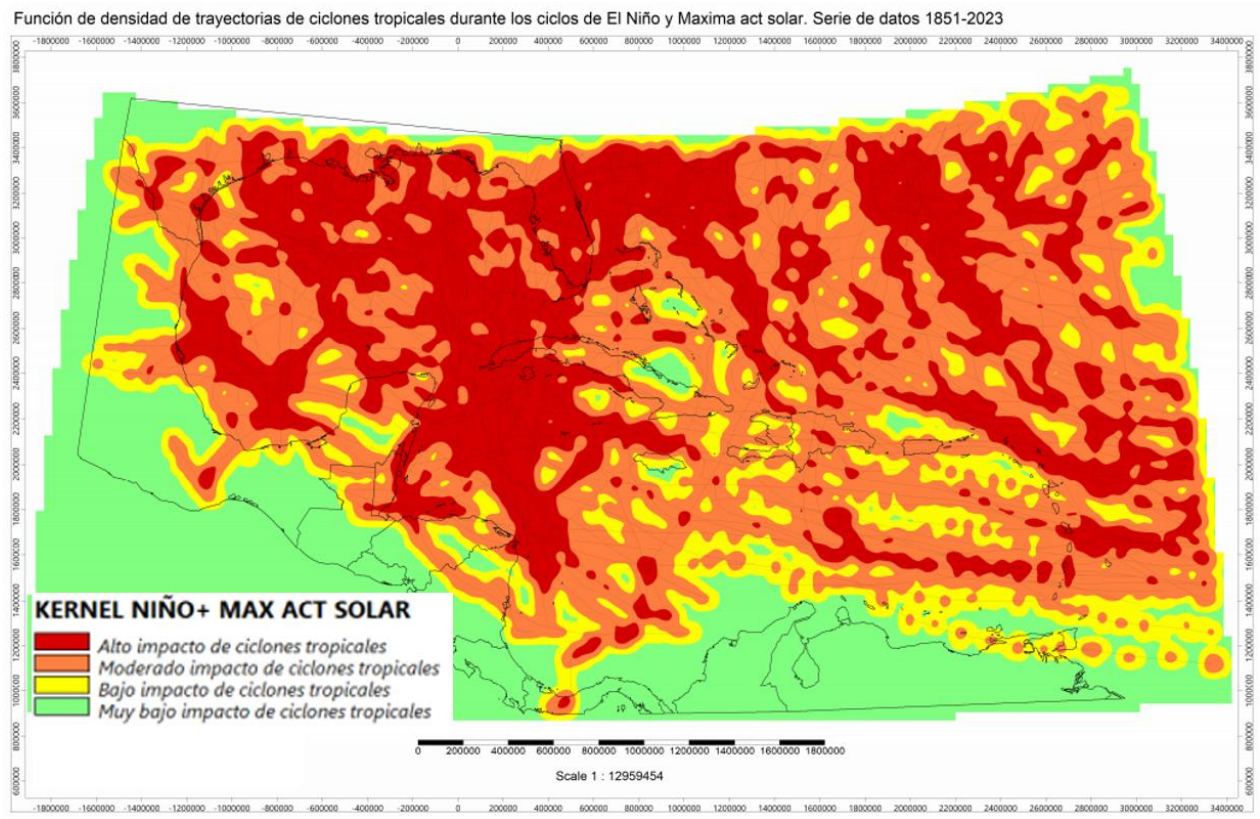
**Fuente:** elaboración propia

### 3.3.2. El Niño + Máximo de Actividad Solar.

Para esta combinación la Figura 8 presenta las mayores afectaciones en el Caribe Occidental y el Norte del Golfo de México, mientras que el sudeste del Caribe muestra menor frecuencia de CT. En general para la Cuba la densidad es alta y se describe de la siguiente forma:

- Zonas de alto impacto: Pinar del Río, La Isla de la Juventud, Artemisa y Mayabeque.
- Zonas de impacto moderado: La Habana, desde la provincia de Matanzas hasta Ciego de Ávila, el sur de Camagüey y las provincias orientales.
- Zonas sin actividad: norte de Camagüey, Las Tunas y Holguín.





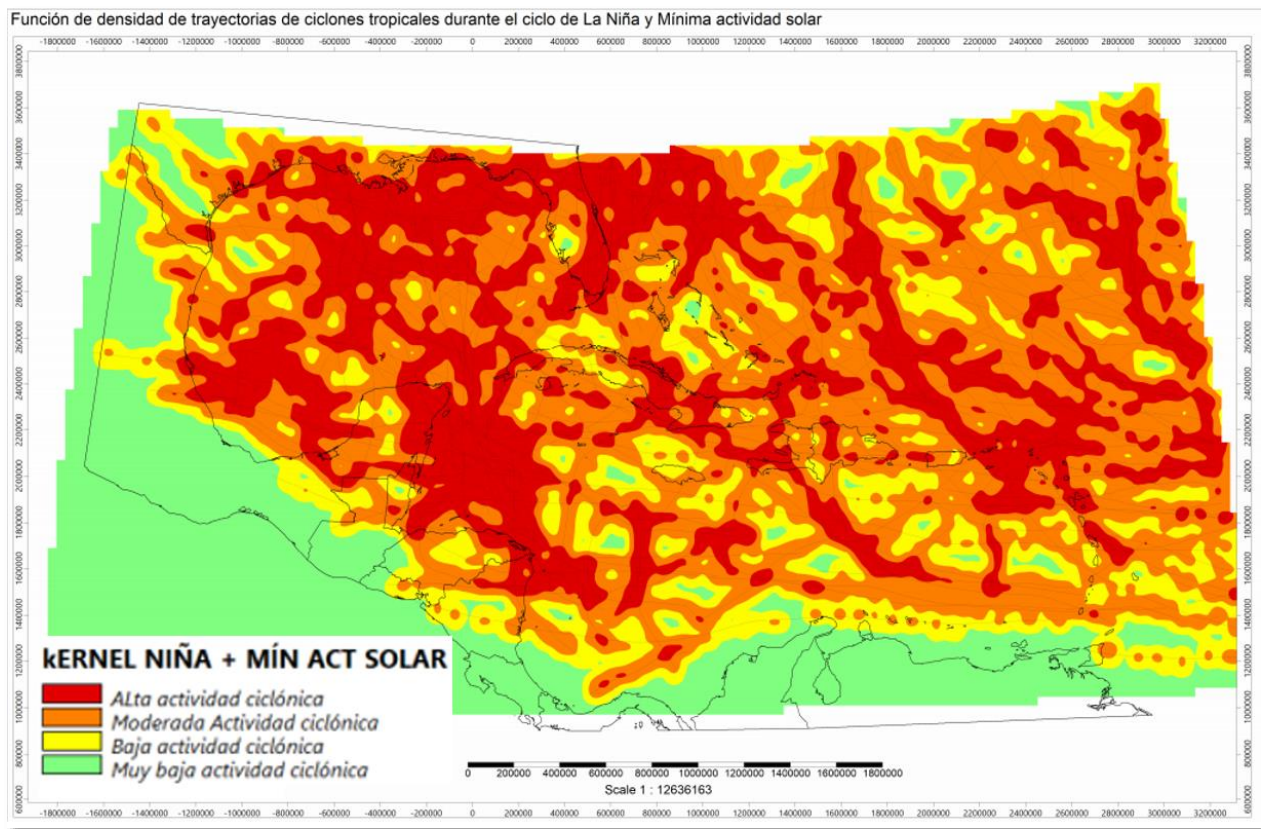
**Figura 8:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Máxima actividad solar y eventos de El Niño.

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.3.3. La Niña + Mínimo de Actividad Solar.

Esta relación muestra la mayor actividad ciclónica de todas con máximos en el Caribe occidental y Golfo de México, y mínimos en el norte de la cuenca atlántica (Figura 9). Por lo que, estos fenómenos combinados potencian temporadas hiperactivas de CT para la región de estudio. Sobre la Isla de Cuba se aprecia el siguiente comportamiento:

- Zonas de alto impacto: Pinar del Río, este de La Isla de la Juventud, norte de Villa Clara y de Ciego Ávila, Camagüey, sur de Holguín, Las Tunas, extremos norte y sur de Granma y Santiago de Cuba.
- Zonas de impacto moderado: extremos norte y sur de Matanzas, Cienfuegos, sur de Villa Clara y de Ciego de Ávila, centro de Granma y Guantánamo casi en su totalidad.
- Zonas de bajo impacto: centro de Matanzas, Sancti Spíritus y Punta de Maisí.



**Figura 9:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Mínima actividad solar y eventos de La Niña.

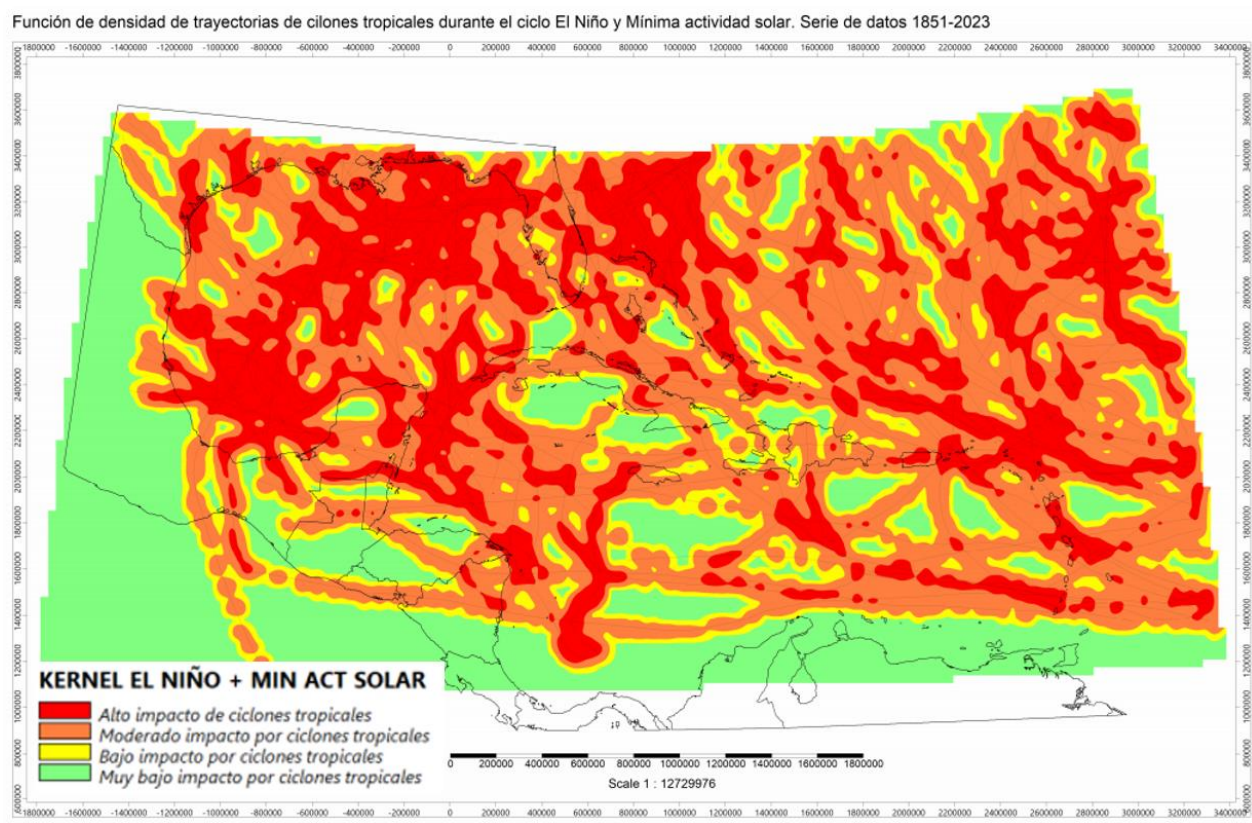
**Fuente:** elaboración propia.

### 3.3.4. El Niño + Mínimo de Actividad Solar

La unión de El Niño con los MínAS brinda la menor actividad ciclónica para la región de estudio. La mayor densidad se concentra en el Norte de El Golfo de México y la menor en las cuencas caribeña y atlántica. Para el territorio cubano el comportamiento se explica a continuación (Figura 10):

- Zonas de alto impacto: Pinar del Río y Camagüey.
- Zonas de impacto moderado: La Isla de la Juventud, Matanzas, Cienfuegos, Norte de las provincias centrales, Las Tunas, Santiago de Cuba y el Oeste de Guantánamo.
- Zonas sin actividad: La Habana, Sur de Sancti Spíritus, Granma y el Este de Guantánamo.



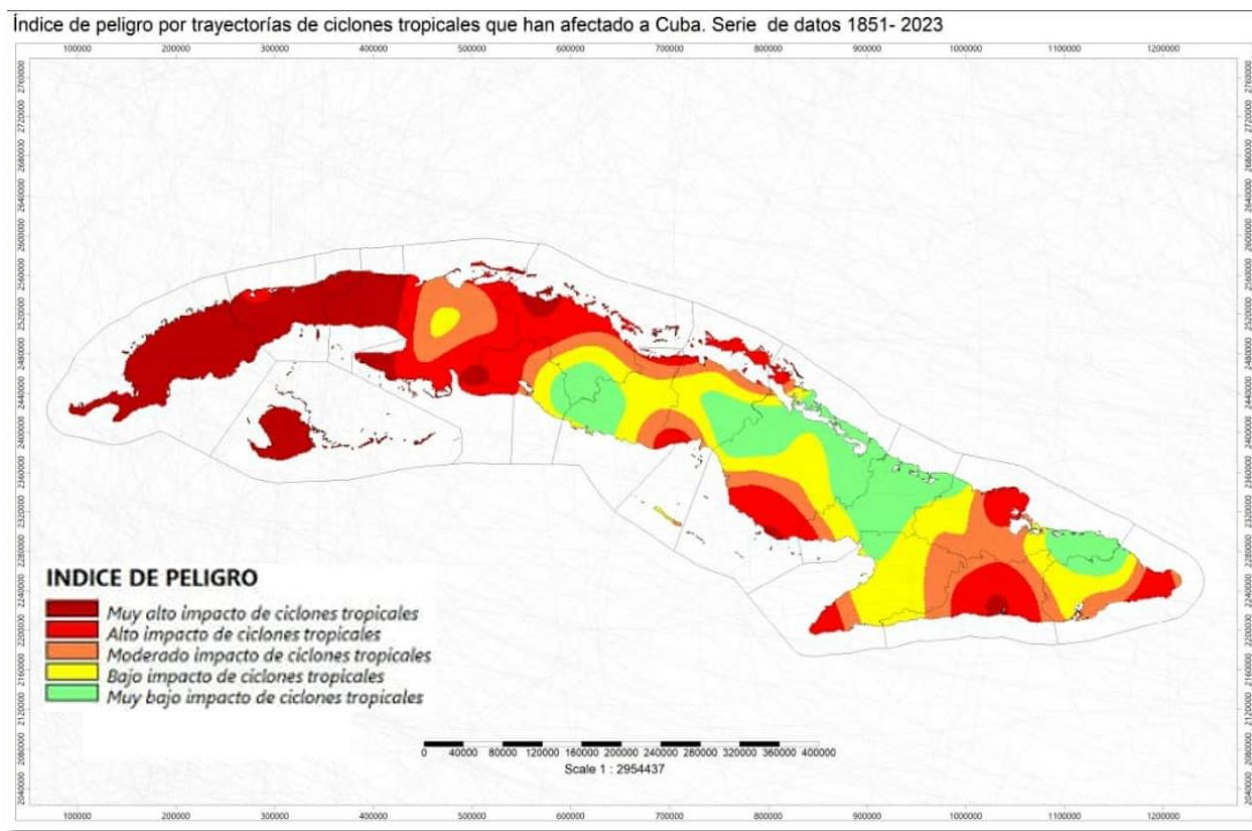


**Figura 10:** Distribución espacial de la función de densidad de trayectorias de ciclones tropicales (1851-2023) para los ciclos de Mínima actividad solar y eventos de El Niño.

**Fuente:** elaboración propia

### 3.4. Índice de peligro por trayectorias de ciclones tropicales para Cuba.

Basado en el índice de peligro obtenido por trayectorias históricas, Cuba presenta una distribución desigual de impactos de ciclones tropicales, con zonas de alto riesgo claramente definidas debido a factores geográficos y climáticos (Figura 11).



**Figura 11:** Índice de peligro para Cuba por trayectorias históricas de ciclones tropicales. Serie 1851 - 2023

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se describen las regiones de alto impacto según el índice:

- Zonas de muy alto impacto: Pinar del Río, La Habana, Artemisa y el municipio Especial Isla de la Juventud, norte de la provincia Holguín.
- Zonas de alto impacto: de Villa Clara (zona Norte), Cienfuegos, Matanzas (parte norte y el sur de la Ciénaga de Zapata), parte norte de la provincia Ciego de Ávila, sur de Guantánamo y Santiago de Cuba casi en su totalidad.

Todas estas zonas se caracterizan por una mayor frecuencia de impactos directos por ciclones, sobre todo de huracanes intensos (categoría 3 o más).

Las áreas con un impacto moderado o bajo serían:

- Zonas de impacto recurrente pero moderado: Camagüey, Las Tunas, Holguín (costa norte), Artemisa (costa norte), en pocas regiones de Santiago de Cuba y en el sur de Guantánamo.
- Zonas de bajo impacto: los interiores montañosos Granma (Sierra Maestra, Macizo, Guamuhaya que es la zona de menor impacto históricamente), centro de Ciego de Ávila, Las Tunas.

Aunque son regiones de menos exposición a trayectorias directas aún presentan vulnerabilidad ante lluvias torrenciales. Ejemplo la tormenta Alberto (2018) generó inundaciones en Granma sin impacto directo del viento.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de las afectaciones en cada área.

**Tabla 7.** Peligro para cada zona del territorio nacional.

<b>Zona</b>	<b>Nivel de Peligro</b>	<b>Frecuencia de Impactos</b>	<b>Ejemplos Históricos</b>
Occidente (Pinar del Río, La Habana e Isla de la Juventud)	Alto	15-20 ciclones significativos (1851-2023)	1926, Michelle (2001), Irma (2017)
Centro (Villa Clara, Cienfuegos, Norte de Ciego de Ávila)	Alto-Moderado	10-15 ciclones	Irma (2017), Ike (2008)
Oriente (Santiago de Cuba, Guantánamo)	Alto (costa sur) / Bajo (interior)	Variable	Flora (1963), Sandy (2012), Matthew (2016)
Interior montañoso	Bajo	<5 ciclones directos	

**Fuente:** elaboración propia.

## Conclusiones

- Los eventos ENOS y los ciclos de Actividad Solar (AS) tienen gran influencia tanto en la formación de ciclones tropicales, como en sus trayectorias en las cuencas de El Atlántico Norte, El Mar Caribe y El Golfo de México.
- Durante los años de La Niña las afectaciones, para Cuba, por ciclones tropicales son mayores en comparación con los años de El Niño.
- Los ciclos de mínima AS provocan una mayor densidad de ciclones tropicales que abarca, casi en su mayoría, el territorio nacional en comparación con los ciclos de máxima donde las mayores afectaciones se concentran más en el occidente.
- Durante los años en que coinciden La Niña con el mínimo de AS y El Niño con el máximo de AS el territorio es más propenso al impacto de un ciclón tropical que en los casos de La Niña con el máximo de AS y El Niño con el mínimo de AS. La combinación de estos últimos ha mostrado numerosas zonas en las que no hay ninguna afectación por ciclones tropicales.
- En la mayoría de estos fenómenos El Caribe occidental y El Golfo de México son las regiones más afectadas por las trayectorias históricas.
- De forma bastante general se puede apreciar como los principales daños, determinados en el índice de peligro, se concentran en región occidental del país, casi en su totalidad. Pero también se pueden extender a determinadas zonas de las regiones central y oriental como el Norte de Camagüey y la provincia de Santiago de Cuba.

## Bibliografía

- Buzai, G., Baxendale, C., Principi, N., Cruz, M., Cacace, G., Caloni, N., Humacata, L., Mora, J., & Viola, F. (2013). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): Teoría y aplicación*.
- Ciclos solares históricos / Actividad solar.* (2025). SpaceWeatherLive.com. <https://spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar/ciclos-solares-historicos.html>

- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8, 2271-2312. <https://doi.org/10.5194/gmdd-8-2271-2015>
- Doval, J. P., Pérez, M. B., Acosta, J. O., & Rodríguez, E. (2013). *CARACTERIZACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA CUENCA ATLÁNTICA EN RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR Y OTRAS VARIABLES*.
- Fotheringham, A., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2000). *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*.
- Generalidades de los Ciclones Tropicales*. (2025).  
<http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=OPTION&TB2=/contenidos/ciclones%20tropicales/generalidades/generalidades.htm>
- Información sobre ENSO: Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA*. (2025).  
[https://psl-noaa-gov.translate.google/enso/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://psl-noaa-gov.translate.google/enso/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- Lin, N. (2012). On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *Journal of Geophysical Research*.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., & Garcia, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348-360. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000300348>
- OpenAI. (2025). ChatGPT (Versión 1.2025.252 GPT-5 de junio) [Modelo de lenguaje de gran tamaño]. <https://chat.openai.com>
- Psl-noaa-gov.translate.google/enso/past\_events.html?\_x\_tr\_sl=en&\_x\_tr\_tl=es&\_x\_tr\_hl=es&\_x\_tr\_pto=tc*. (2025).  
[https://psl-noaa-gov.translate.google/enso/past\\_events.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://psl-noaa-gov.translate.google/enso/past_events.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- Rivera, C. F. (2023). *Estado del Clima en Cuba 2023. Resumen ampliado*.
- Ujoh, J. (2023). *The solar cycle and its impact on earth's climate*.
- What Is the Solar Cycle? | NASA Space Place – NASA Science for Kids*. (2025).  
<https://spaceplace.nasa.gov/solar-cycles/sp/>

### Sobre los autores:

**Lic. Leyani Izquierdo Barrera:** Licenciada en Meteorología, Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA), perteneciente a la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Cuba, [leyaniib@gmail.com](mailto:leyaniib@gmail.com), ORCID ID: 0009-0003-3845-4024.

**MSc. Ing Jorge Olivera Acosta:** graduado en la CUJAE en la especialidad de ingeniería en Geofísica. Especialista en Geomática y Estudios de Riesgos. Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA), perteneciente a la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Cuba, [yoyiga2010@gmail.com](mailto:yoyiga2010@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6887-5132.