

Estructura termohalina en la corriente de lazo, al paso de huracanes que afectaron Cuba en 2002-2022



Thermohaline structure in the loop current, in the presence of hurricanes that affected Cuba in 2002-2022

<https://cu-id.com/2377/v30nspe09>

✉ Ida Mitrani Arenal¹, ✉ Javier Cabrales Infante^{1*}, ✉ Alejandro Vichot Llano¹, ✉ Axel Hidalgo Mayo²

¹Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología de Cuba, Cuba.

²Centro Meteorológico Provincial de Holguín. Instituto de Meteorología de Cuba, Cuba.

RESUMEN: Se presenta una investigación acerca de las particularidades de la estructura termohalina en el área de la corriente de Lazo, al paso de ciclones tropicales que se trasladaron desde territorio cubano o sus cercanías hacia esas aguas del golfo de México en el período 2002-2022. De 38 casos identificados en el área conocida como vórtice cubano, casi un tercio afectó al territorio nacional con intensas lluvias, fuertes vientos, marejadas e inundaciones costeras, con promedio de un caso cada dos años, para un total de 11 que fueron seleccionados como caso de estudio. Es válido señalar que ninguno se originó en esa región, sino que se trasladaron hacia allí, desde el Caribe o el Atlántico. Se logró identificar las zonas más favorables a la intensificación, por sus características oceanográficas, localizadas en las latitudes de 23-24°N, aledañas al canal de Yucatán y hacia la zona sur-oriental del golfo de México, donde la capa isotérmica muestra espesores de más de 50 m y las aguas cálidas, con temperaturas de más de 26°C, ocupan más de una centena de metros. Por otra parte, los altos valores de la salinidad, de más de 36.5 psu, con el máximo localizado entre 150 y 200 m de profundidad, favorecen a la acumulación de calor en la primera centena de metros, desde superficie.

Palabras clave: Ciclones Tropicales, Estructura termohalina, Corriente de Lazo.

ABSTRACT: An investigation is presented, about the particularities of the thermohaline structure in the area of the Loop current, in the wake of tropical cyclones that moved from Cuban territory or its vicinity to those waters of the Gulf of Mexico, during the period 2002-2022. Of 38 cases, identified in the Cuban vortex area, almost a third affected the national territory with strong winds, heavy rain, high waves and coastal flooding, with an average of one case every two years, for a total of 11, that were selected as study cases. It is valid to point out that none of them originated in that region, but rather they moved there, from the Caribbean sea or the Atlantic ocean. It was possible to identify the most favorable areas for hurricane intensification, due to their oceanographic characteristics. They are located in the latitudes of 23-24°N, adjacent to the Yucatán channel and towards the south-eastern area of the Gulf of Mexico; in this zone, the isothermal layer shows thicknesses of more of 50 m and the warm waters, with temperatures of more than 26°C, occupy more than a hundred meters thick. Furthermore, the high values of salinity, with more than 36.5 psu and the maximum located between 150 and 200 m depth, favor the accumulation of heat, in the first hundred meters, from the surface.

Keywords: Tropical Cyclones, Thermohaline Structure, Loop Current.

*Autor para correspondencia: Javier Cabrales Infante. E-mail: Javier.cabrales@insmet.cu

Recibido: 28/01/2024

Aceptado: 14/03/2024

Dr. Ida Mitrani Arenal. Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología de Cuba.

E-mail: ida.mitrani@insmet.cu.

Lic. Javier Cabrales Infante. Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología de Cuba.

E-mail: Javier.cabrales@insmet.cu.

Lic. Alejandro Vichot Llano. Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología de Cuba.

E-mail: alejandro.vichot@insmet.cu.

Msc. Axel Hidalgo Mayo. Centro Meteorológico Provincial de Holguín. Instituto de Meteorología de Cuba.

axel.hidalgo@insmet.cu.

Conflicto de Intereses Han sido declarados como autores a todas aquellas personas naturales que han contribuido sustancialmente en la realización de obra y no existe conflicto de intereses entre ninguna de ellas

Contribución de autores: Dr. Ida Mitrani Arenal: **Investigación, Conceptualización y Redacción.** Lic. Javier Cabrales Infante: **Metodologías y Conservación de datos.** Lic. Alejandro Vichot Llano: **Investigación y Validación.** Msc. Axel Hidalgo Mayo: **Investigación y Validación.**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se desarrolló en el Instituto de Meteorología, dentro del proyecto “La corriente de lazo, su evolución espacio-temporal y su enlace con el desarrollo de los ciclones tropicales”, con el Código: PS211LH004-0, financiado por el Programa Sectorial 04, PCTI: “Meteorología y Desarrollo Sostenible del País”.

El propósito es ampliar los conocimientos acerca de la evolución espacio-temporal de los ciclones tropicales en el Golfo de México, con énfasis en la corriente de Lazo y su estructura termohalina, dada la importancia de estos eventos que con frecuencia afectan a las costas cubanas, con fuertes vientos, lluvia intensa, marejadas e inundaciones costeras.

Como principales antecedentes nacionales, en las últimas tres décadas se identifican dos grupos: A) Las investigaciones realizadas por especialistas cubano-mexicanos desde finales del siglo XX y hasta el presente siglo XXI, acerca del comportamiento de las corrientes de Yucatán y la Florida, así como de las masas de agua, según refieren los trabajos de Gallegos et al (1998), Simanca et al (2012), Rivero Ordaz et al. (2023). Las investigaciones desarrolladas por especialistas cubanos, utilizando datos de mediciones *in situ* durante la ejecución de expediciones oceanográficas cubano-soviéticas, cubano-mexicanas y cubanas, en los años 1966-2000, lográndose posteriormente una caracterización de la estructura y circulación termohalina en aguas cubanas con inclusión de toda la periferia de Cuba, así como su enlace con la actividad ciclónica, según consta en las publicaciones de Mitrani et. al (2008, 2017 a, 2017 b).

Investigaciones recientes, realizadas con observaciones instrumentales *in situ* en el área de la corriente de Lazo, en combinación con observaciones a distancia, demuestran la gran profundidad que pueden alcanzar las aguas cálidas sobre todo hacia el núcleo de los vórtices anticiclónicos, con diferencias considerables con respecto a la periferia (Minuer et al. 2018, 2019, 2022). También corroboran la típica distribución vertical de la salinidad, con su máximo en profundidades entre 150 y 200 m como promedio. En las investigaciones de Minuer et al. 2022, se afirma que durante 29 años (1993-2021) se logró coleccionar datos oceanográficos en extensas áreas del golfo de México, pero son más escasas en las cercanías de las aguas cubanas y casi ausentes dentro de ellas, por lo que se logra caracterizar en gran medida a la corriente de Lazo al norte de los 22°N, sobre todo en su segundo vórtice, observado en la mitad oriental del golfo y no en el localizado en las cercanías de Cuba, también identificado como “vórtice cubano”. Como otra limitación, también se aprecia que las observaciones *in situ* no son continuas en el tiempo, pero el colectivo de autores tomó como solución, la combinación con observaciones a distancia, logrando

representar de forma general la evolución de los vórtices estudiados y la estructura termohalina que los caracteriza, con mayor calidad fuera del vórtice cubano.

Las investigaciones existentes acerca del área de interés, se han referido de forma general a las posibles relaciones entre la intensificación o al menos mantenimiento de intensidad, de los ciclones tropicales que alcanzan esta área y la estructura termohalina de la corriente de Lazo, así como en la conformación de la circulación anticiclónica que la caracteriza, pero conocer los detalles de lo que ha ocurrido en los diversos casos y alcanzar una mejor comprensión acerca de estos procesos físico-geográficos, sería un gran avance para elevar la calidad en la predicción del tiempo al paso de los ciclones tropicales y en la aplicación de modelos numéricos para pronosticar su evolución, con todos los eventos de peligro que les acompaña. Como aspecto co-lateral, el estudio del estado térmico de las aguas cercanas a Cuba y de su estructura termohalina, serían de aplicación en acciones de manejo del medio marino y costero, de interés para el turismo, actividades deportivas, la pesca y estudios de uso de energía marina como fuente renovable para generación de electricidad.

El objetivo general del presente trabajo, es una caracterización de la estructura termohalina en las aguas de la corriente de Lazo, al paso de ciclones tropicales por las cercanías o sobre territorio cubano, que generaron daños notables en el país, con identificación de las zonas con las condiciones oceanográficas más favorables para la intensificación de esos eventos a su salida al golfo de México, utilizando datos de archivos y re-análisis, libremente disponibles.

Cualquier novedad en el conocimiento de la corriente de Lazo, también beneficia a las poblaciones de naciones aledañas al Golfo de México, con costas en el área y con frecuencia afectadas por ciclones tropicales, como son México y los Estados Unidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las Figuras 1 a, b se identifican las áreas de estudio; en la Figura 1 (a), aparece una imagen de la corriente de Lazo en su totalidad, tomada del compendio de artículos de National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina, por sus siglas en inglés NASEM, 2018), donde se aprecian las tres formas en que se presenta este sistema de circulación oceánica: retraído, donde solo se conforma el vórtice cercano a Cuba, conocido “vórtice cubano”, extendido con doble vórtice y con un vórtice que sea desprendido del Lazo. En 1 (b), se muestra el polígono de las aguas cercanas a Cuba (imagen tomada del Atlas GEMCO (2009), que es donde se localiza el

“vórtice cubano” y a donde arribaron o por donde se movieron los 11 casos de ciclones tropicales seleccionados para estudios de caso en el presente texto, que afectaron al territorio nacional, durante el período de estudio 2002-2022.

a) Fuente de datos oceanográficos, HYCOM (2022)

Se tomaron los datos oceanográficos del sitio web del modelo oceanográfico HYCOM (2022), que brinda entre sus productos, diversas matrices numéricas y gráficos de re-análisis con datos del pasado, que si bien están destinados principalmente a experimentos numéricos con este modelo, también pueden ser utilizados por los usuarios para estudios de diagnósticos (como es la presente investigación), evaluaciones de modelos numéricos (con inclusión del propio HYCOM), corridas para estudios climáticos, simulaciones y uso experimental en general.

Los Re-análisis de entrada del modelo numérico oceánico HYCOM, permiten representar las características oceanográficas de salinidad, temperatura del agua y velocidad y dirección de las corrientes marinas en el área de interés (Figuras 1 a, b). En la presente investigación, se utilizaron los niveles de superficie (0), 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 800, 1000, 1500 y 2000. Como proveedores de estos re-análisis, en los archivos utilizados se identifican las observaciones desde el sistema de boyas de la National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NOAA por sus siglas en inglés), desde buques y flotadores del sistema Argos, utilizando batitermógrafos desechables (más conocidos por su sigla en inglés XBTs, expendable bathithermographs) y equipos CDT con registros de conductividad-temperatura-profundidad (conductivity-temperature-depth, más conocidos por su sigla en inglés, CDT), observaciones desde radares oceanográficos y desde satélites, con datos de temperatura, salinidad, altimetría, corrientes marinas y otros, procedente del Global Ocean Observing System (Sistema Global de Observaciones Oceánicas, GOOS por sus siglas en inglés). Los archivos fueron localizados en el sitio web del propio modelo HYCOM, exactamente en: ftp://ftp.hycom.org/datasets/GLBb0.08/expt_53.X/data/archm/

La descripción de la estructura del modelo oceanográfico HYCOM en su versión 2.2 (Hybrid Coordinate Ocean Model 2.2) esta disponible en el sitio web del modelo (HYCOM, 2022). Es producto del esfuerzo de investigadores de instituciones norteamericanas, como son la Universidad de Miami, el Laboratorio Nacional de Los Alamos y el Laboratorio de Investigaciones Navales. Consiste en un modelo global, conformado con ecuaciones primitivas, que representan la circulación general



Figura 1 (a). La Corriente de Lazo en sus tres estados: a) Retraído b) Extendido c) Con tres vórtices (Imagen tomada de NASEN, 2018)

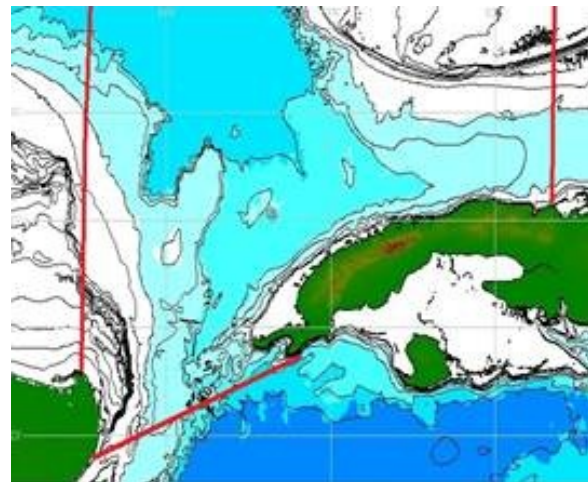


Figura 1 (b). Sub-área de interés. Incluye la batimetría de las aguas aledañas a Cuba en el Golfo de México (GEBCO 2009)

oceánica con pasos de $1/12^\circ$ (unos 9 km en latitudes tropicales) y coordenadas verticales isopícnicas que reflejan las propiedades del océano abierto y estratificado, desde la superficie hasta el fondo marino; estas coordenadas hacen una transición suavizada a coordenadas Z en aguas débilmente estratificadas y/o en la capa de mezcla superficial, hacia coordenadas sigma en aguas someras y regresa a coordenadas Z en aguas muy poco profundas.

Los re-análisis en profundidad y superficie de salinidad (S), temperatura del agua de mar (T_w) y corrientes marinas (V), utilizados en la presente investigación, correspondieron a los horarios sinópticos de las 0000, 0006, 0012 y 0018 UTC. En los módulos de asimilación de datos y preparación de mallas del modelo, los datos se procesan por interpolación óptima multivariada en el plano horizontal y en el vertical, hacia las coordenadas verticales isopícnicas, descritas anteriormente. Las salidas numéricas de este procesamiento fueron procesadas en coordenadas verticales (Z) graficadas

en mallas de latitud/longitud mediante el uso del software GrADS (2018), versión 2.2.1 y también se analizaron las imágenes animadas, mediante el uso de del software Ncview (2017), versión 2.1.8, muy ventajosos puesto que ambos software son libremente disponibles.

b) Reportes de archivo del Centro Nacional de Huracanes (NHC, 2023)

De los archivos del Centro Nacional de Huracanes (National Hurricane Center, NHC por sus siglas en inglés), se tomaron los reportes y trayectorias de ciclones tropicales que pasaron por el área de estudio, sobre las cercanías o sobre tierra del territorio noroccidental cubano en 2002-2022.

Durante el periodo de estudio se identificaron 38 ciclones tropicales que transitaron sobre el sudeste del golfo de México, donde se localiza la parte sur de la Corriente de Lazo (polígono de la Figura 1 b). De ellos, 16 casos pasaron sobre territorio o por las cercanías de Cuba, y en los textos de los reportes se expresa que generaron marejadas, lluvias, fuertes vientos e inundaciones costeras de diversa intensidad. De estos 16, se identificaron 5 casos que no ocasionaron graves daños al país, por lo que fueron descartados. Como casos de estudio del presente texto, se seleccionaron los 11 casos que afectaron la costa noroccidental de Cuba, de los cuales un total de 10 que tocaron tierra cubana, pero además se incluyó Wilma 2005, que causó daños millonarios aunque no tocó tierra cubana.

c) Resúmenes de Temporadas del Instituto de Meteorología (INSMET, 2023)

Para valorar con más detalle, la afectación a territorio cubano, se consultaron los Resúmenes de Temporada, publicados por el Instituto de Meteorología en su sitio web (INSMET, 2023). Se confirmó que en los años 2002-2022 un total de 36 huracanes afectaron diversas regiones de Cuba de alguna manera, sea pasando sobre su territorio o sobre aguas aledañas, con fuertes vientos, lluvias, marejadas e inundaciones costeras. Se identificaron 19 casos que generaron inundaciones costeras de importancia en costas cubanas; tres de estos eventos generaron inundaciones severas en La Habana. De la lectura de los resúmenes, se confirma con más detalles la afectación de los 11 casos, ya identificados en los reportes de NHC (2023), que causaron considerables daños en Cuba y afectaron las costas occidentales, saliendo posteriormente al golfo de México, sobre las aguas ocupadas por la corriente de Lazo, específicamente sobre el conocido “vórtice cubano” ; 10 de ellos pasaron sobre alguna zona del territorio nacional, salvo Wilma del 2005 que no tocó tierra pero generó en La Habana la inundación costera más severa

de que se tiene noticia, por la magnitud de su alcance tierra adentro y los daños socio-económicos ocasionados.

Los casos de estudio para el análisis de la estructura termohalina a su paso por las cercanías de Cuba y la corriente de Lazo aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de casos de estudio que se movieron por las cercanías de Cuba y sobre la corriente de Lazo, utilizados para el análisis de la estructura termohalina.

No.	AÑO	NOMBRE
1	2002	Isidore
2	2002	Lily
3	2004	Charley
4	2004	Iván
5	2005	Dennis
6	2005	Wilma
7	2008	Ike
8	2008	Gustav
9	2017	Irma
10	2021	Ida
11	2022	Ian

Las trayectorias de los huracanes tomados como casos de estudio, se muestran en la Figura 2. Los gráficos se tomaron de los reportes conservados en los archivos de NHC (2023), por lo que presentan diversos diseños en dependencia de la época de su elaboración, pero se aprecia claramente su traslado sobre los mares interamericanos y las indicaciones de sus diversas etapas de desarrollo. Obsérvese que aunque muestran diversos puntos de origen, todos terminaron sus trayectorias en las costas de Estados Unidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la Figura 2 se aprecia que de los once ciclones tropicales analizados, 9 pasaron sobre Pinar del Río desde el oeste del Caribe, 1 atravesó el canal de La Florida y 1 hizo una trayectoria de recurva hacia el nordeste desde la costa mexicana hasta La Florida, pasando muy cerca pero sin tocar tierra cubana. Todos tuvieron como destino final las costas de Estado Unidos, mayormente entre la Luisiana y La Florida, salvo Ida de 2021, que alcanzó las costas de Texas.

De la lectura de los reportes NHC (2023) se apreció que la mayoría de los casos estudiados (7 en total) se originaron de ondas salientes de Africa y se trasladaron desde el Atlántico hacia el oeste. Solo 2 casos se originaron en el Atlántico Tropical Central (Isidore y Lily 2002) y otros 2 en el Caribe (Wilma 2005 e Ida 2021). Ninguno se originó sobre el área de la corriente de Lazo colindante con Cuba.

La forma más frecuente de la corriente de Lazo al paso de los casos estudiados, fue la extendida con su tres vórtices (6 casos), seguida de la extendida con dos

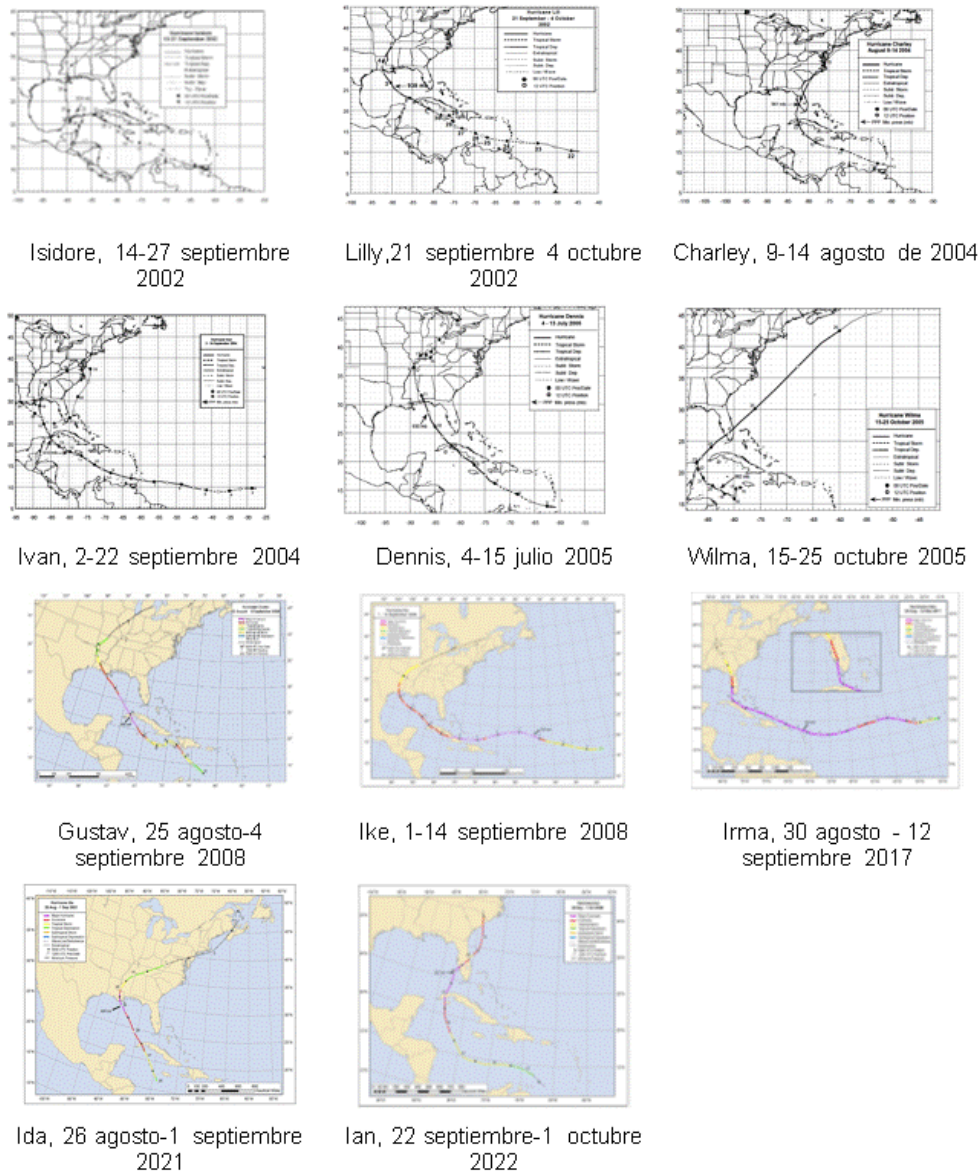


Figura 2. Trayectorias de huracanes que afectaron de forma severa a la región occidental de Cuba durante el período 2002-2022

vórtices (3 casos) más dos casos retraída, que fueron Isidore y Lilly en 2002; debido al entorno atmosférico desfavorable, Isidore al salir de tierra se recuperó ligeramente, pero no continuó la intensificación, sino que aumentó de tamaño; Lilly, por el contrario, ganó en organización y se intensificó a su salida al golfo de México. En el caso de Gustav del 2004, se comportó de modo semejante a Isidore, sobre la corriente de Lazo extendida.

A modo de ejemplo, en la [Figura 3](#) se muestran las diversas formas de circulación oceánica al paso de Lilly del 2002 a su salida del occidente de Cuba sobre la corriente de Lazo en su fase retraída, Ike del 2004, que coincidió con fase extendida, Wilma del 2005 que se desplazó desde el oeste con fase extendida y con vórtice desprendido, Irma del 2017 que procedía del este, sobre fase extendida y también Ida de 2021, con fase extendida y vórtice desprendido. Estos casos fueron especialmente intensos; según aparece en los

textos de los reportes de NHC y resúmenes de temporada del INSMET, encontraron ambientes atmosféricos favorables que al combinarse con el aporte de calor del océano, ocasionaron una gran intensificación.

No es posible identificar un enlace entre los estados de la corriente de Lazo y la intensificación de los 11 huracanes estudiados, puesto que ese proceso lo mismo ocurre con la forma retraída que la extendida de dos vórtices o tres. Sería necesario utilizar una muestra más amplia y la aplicación de modelos numéricos de ciclones tropicales, para comprender si en efecto, una forma u otra de la corriente de Lazo influye más o menos en los procesos de intensificación.

Téngase en cuenta que si bien la interacción con la forma extendida implica mayor pérdida de energía cinética del huracán, puesto que está transmitiendo su circulación ciclónica a un medio más denso y con

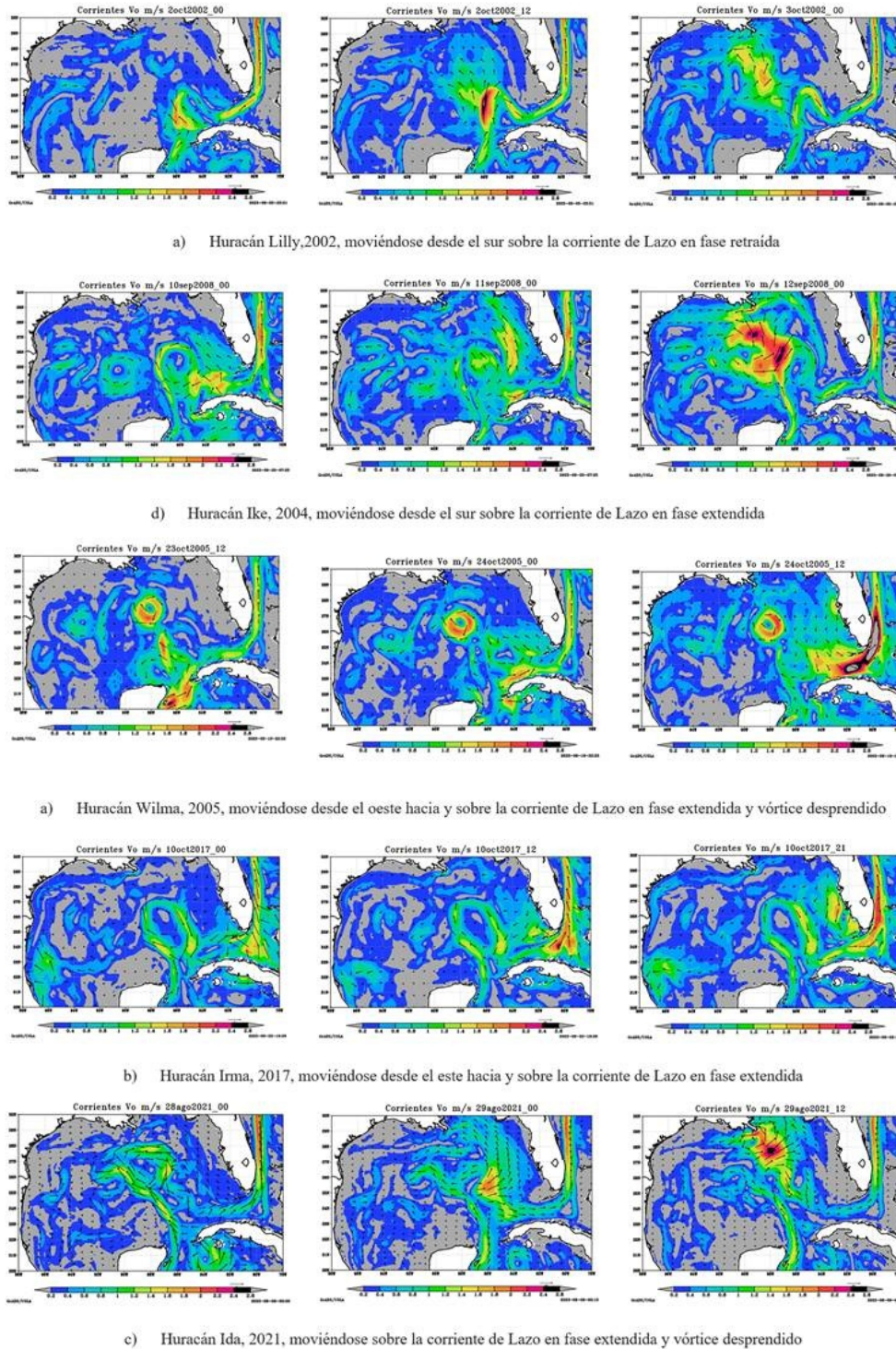


Figura 3. Diversos ejemplos de formas de la corriente de Lazo en interacción con huracanes

circulación completamente contraria (anticiclónica), los vórtices oceánicos a su vez, son colectores de energía térmica que en ese momento se está cediendo al huracán en forma de calor sensible y latente, que pasa a incrementar la energía cinética interna del mismo.

Se observó, en cambio, que si bien se deforma ocasionalmente la circulación anticiclónica al interactuar con la estructura ciclónica del huracán y

entonces aparece una circulación ciclónica en el mar, esta no perdura mucho en el tiempo; la circulación anticiclónica se restablece con rapidez, en menos de 24 horas, aún al paso de huracanes particularmente intensos.

Al paso de los once huracanes estudiados entre 2002 y 2022 por aguas del golfo de México, especialmente sobre la corriente de Lazo, se aprecia que la temperatura superficial se mantuvo en el

entorno de los 30°C, con una concentración de aguas cálidas en la mitad occidental del golfo de México, sobre el área conocida como golfo de Campeche, donde con frecuencia alcanzó los 31°C y más, como lo demuestra la Figura 4 a,b,c, a modo de ejemplo, al paso de Charley en 2002, Wilma en 2005 e Ida, en 2021. Obsérvese que si bien al paso de Wilma, los valores de T_o no eran tan altos (27-29°C), de todos modos eran favorables a la actividad ciclónica en combinación con el entorno atmosférico, de modo que incluso la estrecha huella fría que creó el propio huracán, no fue suficiente para un debilitamiento, sobre todo porque en esa área la capa de aguas cálidas pasa de los 100 m.

El análisis de los perfiles latitudinales y longitudinales de la temperatura del agua (T_w), muestran que la capa isotérmica se conserva en el entorno de los 50 m con profundización en decenas de metros hacia el canal de Yucatán y el centro del golfo, sobre todo en el entorno de la latitud de 24°N dentro de la corriente de Lazo, donde frontera inferior de las aguas cálidas, de más de 26°C, se localiza hasta los

100 m de profundidad y ocasionalmente más allá. Es sobre la latitud 24°N, donde se observa la mayor ocurrencia de intensificación, a lo cual contribuye las altas temperaturas de la superficie marina. Sin embargo, en el polígono de estudio (Figura 1 b) no se observó ningún caso de ciclogénesis, confirmando los análisis de Mitrani et al (2017b). En las Figuras 5 a,b,c se ilustra con algunos ejemplos gráficos las condiciones térmicas oceánicas que precedieron a los huracanes.

Los perfiles longitudinales de las Figuras 6 a,b,c, demuestran que al moverse sobre aguas del golfo de México, aunque los huracanes provoquen ascensos de aguas de niveles inferiores, no es suficiente para debilitarlos, dado el espesor de las aguas cálidas que ocupan más de 50 m.

La salinidad en el área, se mantuvo sobre los 36.5 psu principalmente en latitudes por debajo de 27°N, según se ejemplifica con la imagen de las Figuras (7 a,b,c). En las cercanías de la costa norteamericana, el aporte de agua fresca del continente tributa a una franja de baja salinidad, coincidente con espesores de

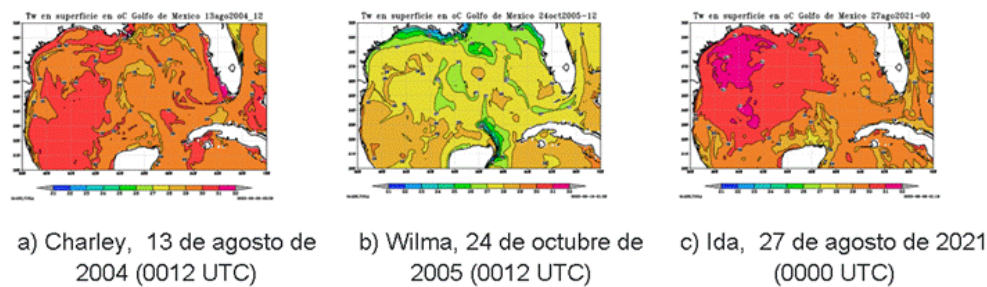


Figura 4. Distribución de T_w superficial en el Golfo de México, al paso de diversos huracanes, arribantes desde territorio cubano

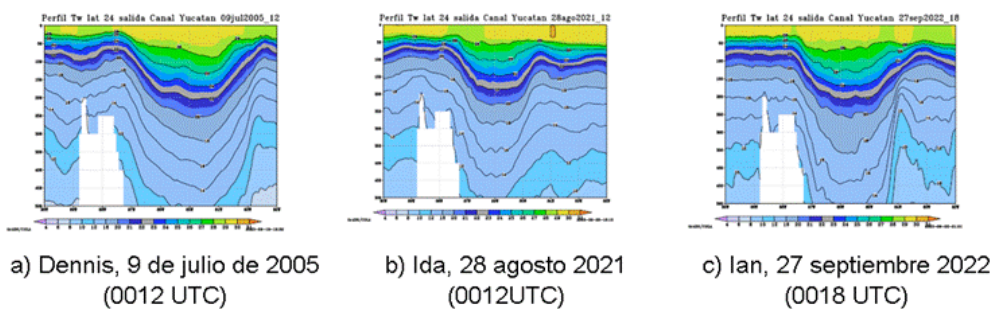


Figura 5. Perfiles verticales de T_w en los 24°N, entre 82°W y 90°W, a la salida de Cuba de diversos huracanes sobre la corriente de Lazo

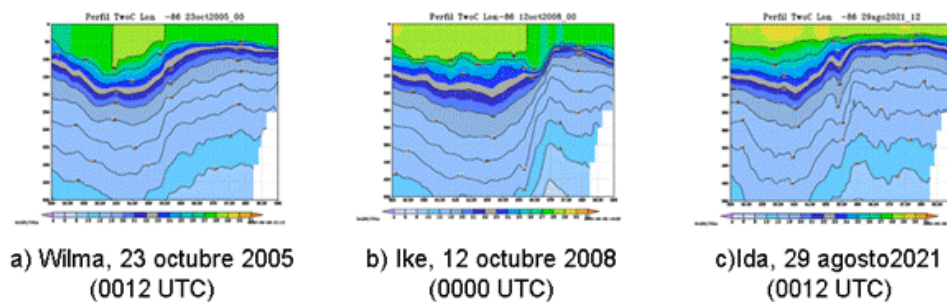


Figura 6. Perfiles de T_w sobre la longitud 86°W, entre 22°N y 29°N, ante el paso de diversos huracanes sobre la corriente de Lazo

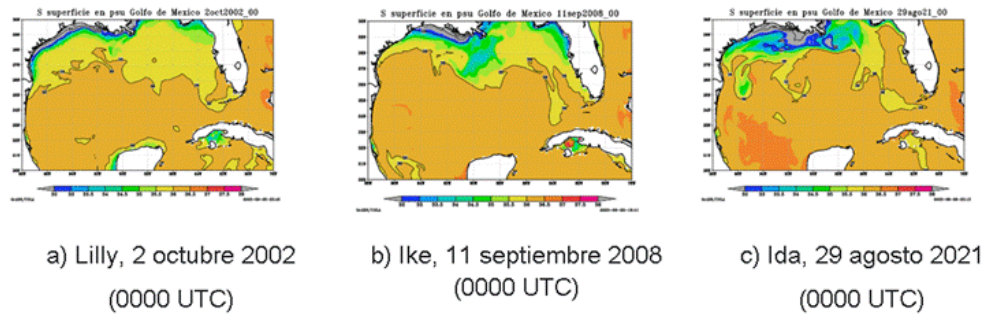


Figura 7. Distribución de la salinidad en el Golfo de México, al paso de diversos huracanes procedentes de Cuba.

la capa isotérmica cercanos a los 50 m pero las aguas cálidas con temperaturas mayores de 26°C se sumergen solo una o dos decenas más de metros, a diferencia del resto del golfo donde ocasionalmente pasan de 100 m. Esta situación no contribuye a una gran intensificación y de hecho hubo un par de casos en que con ambiente atmosférico adverso, al acercarse a las costas de Estados Unidos se debilitaron pero tampoco se expandieron al trasladarse sobre la mitad norte del golfo de México; ellos son Lilly del 2002 y Dennis, del 2005, según consta en los reportes de huracanes, de los archivos de NHC (2023) y en los resúmenes de temporadas ciclónicas del INSMET (2023). Sin embargo, en el caso de Ida de 2021, fue precisamente en esas latitudes donde se observó su momento de mayor intensidad, porque además de un entorno atmosférico favorable, la temperatura del agua se mantuvo excesivamente alta, con más de 30°C (ver la Figura 4 c). Es posible que los aportes de agua fresca del continente y en especial del el río Mississippi, modulen los cambios en la estructura termohalina desde la alternancia de lluvia-sequía sobre sus cuencas, del mismo modo que los aportes del Amazonas pueden modular a la actividad ciclónica del Atlántico, según lo descrito por (Mitrani et al 2020).

En resumen, la mayoría de los casos estudiados, se desarrollaron entre la última década de agosto y primera de octubre, en coincidencia con las máximas temperaturas del área interamericana, según muestra el curso anual promedio de esta variable para aguas cubanas (Mitrani et al 2017a). Se manifiesta como excepción el año 2005, de muy intensa actividad ciclónica, acorde con los patrones de circulación atmosférica asociados al evento NIÑA y con los bajos aportes de agua fresca desde la cuenca del Amazonas (Mitrani et al 2020), así como las aguas excepcionalmente cálidas del Atlántico, favorecieron la formación e intensificación de Dennis en el mes de julio y de Wilma en la última década de octubre, uno de los huracanes más intensos de que se tiene noticia en el Atlántico y sin embargo, las aguas del golfo de México no mostraron valores de T_o tan altos.

Casi todos los casos presentaron etapas de intensificación, principalmente sobre el canal de Yucatán y a la salida de este canal en el entorno de

24°N, con sus más de 100 m de espesor de aguas cálidas; solo dos casos no se intensificaron al salir de esta área y continuar camino: Isidore 2002 (se intensificó solo sobre los 24°N) y Gustav 2008, puesto que el ambiente atmosférico les fue adverso pero se expandieron en su dimensión horizontal, a partir de las favorables condiciones oceánicas. En el caso de Ivan 2004, no se intensificó en el canal de Yucatán porque su circulación cubría tierra cubana (sector derecho) y mexicana (sector izquierdo) pero sí tuvo una pronta recuperación al salir al Golfo de México y se intensificó sobre las aguas de la corriente de Lazo.

En la Tabla 2, se resumen todas las particularidades antes mencionadas, de los casos de estudio. Se aprecia que seis casos nunca se debilitaron sobre el Golfo de México, dadas las favorables condiciones oceánicas y atmosféricas. Algunos se debilitaron en las cercanías de Luisiana, Estados Unidos pero continuaron siendo potentes ciclones tropicales y solo dos perdieron intensidad de forma significativa, debido al entorno atmosférico adverso.

CONCLUSIONES

1. El área de máxima temperatura superficial durante las temporadas ciclónicas analizadas, se localizó en la zona suroccidental del golfo de México, sobre las aguas del golfo de Campeche, con más de 30°C y ocasionalmente más de 31°C, principalmente en agosto-septiembre-octubre, favoreciendo tanto la ciclogénesis como la intensificación de los ciclones tropicales.
2. En toda el área del golfo de México, la latitud más frecuente de intensificación es la latitud de 24°N, donde se observan los mayores espesores de las aguas cálidas, de más de 26°C.
3. Toda el área de la corriente de Lazo se presenta como zona de intensificación pero no de frecuente ciclogénesis. Especialmente en aguas cubanas, no se encontró ningún caso de disturbio inicial sobre el vórtice cubano, confirmando lo expresado en investigaciones anteriores por Mitrani et al. (2017b).
4. La mayoría de casos que arriban a la corriente de Lazo provienen del recorrido Atlántico-Caribe,

Tabla 2. Características principales de los huracanes que fueron analizados como casos de estudio

Fecha	Nombre	Origen del disturbio inicial	Trayectoria Cuba-Golfo de México	Lugares de Intensificación	Estado de la corriente de Lazo	Lugares de Debilitamiento	Destino final
14-27 sep 2002	Isidore	Atlántico, sur del arco de Las Antillas	Cabo San Antonio- golfo de México, hacia el Norte	Canal de Yucatán- golfo de México, entre 22-23°N con 85°-90°W	Retraída, un solo vórtice	Sobre 90°W, pasados los 23°N; nunca se recuperó pero se expandió.	Estados Unidos, Luisiana
21 sep- 4 oct 2002	Lily	Atlántico Tropical Central	Cabo San Antonio, hacia el NW	Sobre el Golfo de México hasta los 26°N	Retraída, un solo vórtice	Pasados los 26°N, sobre aguas frescas, cerca de USA	Estados Unidos, Luisiana
9-14 ago 2002	Charley	Onda desde África	La Habana-hacia el estrecho de la Florida	Golfo de México y canal de la Florida, 23-24°N	Extendida, 1er y 3er vórtices, débiles	No se degradó	Estados Unidos, costa oeste de la Florida
2-24 sep 2004	Iván	Onda desde África	Cabo San Antonio-canal de Yucatán y después hacia el NNW	Golfo de México, entre los 23°-27°N	Extendida, con tres vórtices	Sobre canal de Yucatán porque gran parte está sobre tierra, y luego al sur de Estados Unidos	Estados Unidos, Extremo oeste de la Florida
4-13 julio 2005	Dennis	Onda desde África	Este de LaHabana	Golfo de México, entre los 23°-29°N	Extendida, 1er vórtice débil y sin 3ro.	Al sur de Estados Unidos	Estados Unidos, Extremo oeste de la Florida
15-25 oct 2005	Wilma	Caribe, sur de Jamaica	Canal de Yucatán-México-canal de Yucatán-norte de Cuba	Golfo de México, entre los 23°-24°N	Extendida, con tres vórtices, el 3ro independiente	No se degradó	Estados Unidos, costa oeste de la Florida
25 ago-4sep 2004	Gustav	Onda desde África	Centro de Pinar del Río-Golfo de México	No aumentó de categoría	Extendida, con tres vórtices,	Se debilitó por condiciones del aire superior, pero se expandió	Estados Unidos, Luisiana
1-14 sep 2008	Ike	Onda desde África	Centro de Pinar del Río-Golfo de México	Golfo de México, desde los 23°C hasta los 29°C	Extendida, con tres vórtices,	No se degradó	Estados Unidos, Texas
30 ago-12 sep 2017	Irma	Onda desde África	Costa norte de Cuba-canal de la Florida, extremo oriental del golfo de México	Golfo de México, entre los 23°-24°N	Extendida, 1er vórtice débil, tercero no se observa	No se degradó	Estados Unidos, costa oeste de la Florida
26 ago-1 sep 2021	Ida	Caribe, sur de Jamaica	Centro de Pinar del Río-Golfo de México	Todo el golfo, con la presión mínima en los 28°N	Extendida, 1er vórtice débil, tercero no se observa	No se degradó	Estados Unidos, Luisiana
22 sep-1 oct 2022	Ian	Onda desde África	Centro de Pinar del Río-Golfo de México	Golfo de México, entre 23-27°N	Extendida, con tres vórtices	No se degradó	Estados Unidos, costa oeste de la Florida

pasando por territorio cubano o sus cercanías. Todos los casos estudiados, posteriormente alcanzan las costas de Estados Unidos y en su mayoría, sin degradarse.

5. El análisis de la estructura termohalina en aguas de la corriente de Lazo durante las temporadas ciclónicas estudiadas, mostró que al emerger los ciclones tropicales desde territorio cubano o cercanías al golfo de México, las condiciones oceánicas siempre son favorables al desarrollo de estos eventos, de manera que si el ambiente atmosférico no es favorable, entonces emplean la energía oceánica disponible en expandirse.
6. La temperatura superficial se mantuvo sobre los 29-30°C y ocasionalmente mayor, con la salinidad sobre los 36.5 psu. El espesor de la capa isotérmica se mantuvo sobre los 50 m y la isotérma de 26°C se localizó varias decenas de metros más profunda, especialmente hacia el centro del canal de Yucatán y su continuación hacia el golfo de México, donde las aguas cálidas pueden pasar de los 100 m de profundidad, especialmente entre los 23°N (canal de Yucatán) y los 24°N.
7. Los espesores de aguas cálidas, disminuyen desde la mitad sur del golfo de México hacia la costa norteamericana pero no lo suficiente como para debilitar a los ciclones tropicales, de manera que el efecto up welling y generación de huella fría no influye mucho en el debilitamiento de los huracanes, dado que emergen aguas cálidas, con temperaturas relativamente altas.
8. No se encontró una relación entre la intensificación de los huracanes y la forma de la corriente de Lazo, pero se observó que los vórtices anticiclónicos, aunque pueden desaparecer por varias horas al imponerse la interacción con un huracán, posteriormente se recuperan con rapidez, en menos de 24 horas. Ello demuestra la prevalencia del efecto favorable de la energía térmica que entrega el océano al huracán, sobre la pérdida de energía cinética de la circulación ciclónica al imponerse sobre la circulación anticiclónica de los vórtices de la corriente de Lazo.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar la muestra de huracanes que pasaron sobre la corriente de Lazo, principalmente con aquellos casos que se acercaron o pasaron por Cuba, aunque no hayan causado grandes daños.
2. Analizar la estructura termohalina en las corrientes de entrada-salida de la corriente de Lazo, por el canal de Yucatán y el estrecho de La Florida, y su posible relación con el evento ENOS
3. Analizar otros fenómenos severos de interés, como es la producción de lluvia, su relación con la

estructura termohalina y posible comportamiento futuro.

4. Acorde con la disponibilidad de información y medios computacionales, ampliar los estudios de ocurrencia de marejadas y proyecciones futuras, utilizando modelos numéricos de mayor resolución
5. Incorporar estudios de potencial térmico de la capa isotérmica y desde la isoterma de 26°C al paso de los ciclones tropicales por el área de estudios.
6. Incorporar análisis que argumenten la necesidad de datos in situ en las cercanías de Cuba
7. Publicar todos los resultados obtenidos en revistas especializadas
8. Promover un doctorado en el tema de peligro meteorológico y proyecciones futuras
9. Estrechar los enlaces con el proyecto POGO y de aprobarse el presente resultado científico, aportarlo a ese proyecto en forma de monografía

AGRADECIMIENTOS

El colectivo de autores agradece el financiamiento en CUP del PROGRAMA SECTORIAL- 04 del PCTI: Meteorología y Desarrollo Sostenible del País, el apoyo incondicional de los familiares y amigos que facilitaron el trabajo a domicilio, así como a los organizadores de los diversos congresos, fórum y muy en especial a la Revista Cubana de Meteorología, donde han sido divulgados los primeros resultados de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- COLA & GMU. (2018). *Grid Analysis and Display System (GrADS) (2.2.1)* [Computer software]. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA). George Mason University (GMU). <https://cola.gmu.edu/grads/download.php>
- Committee on Advancing Understanding of Gulf of Mexico Loop Current Dynamics, Gulf Research Program, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). *Understanding and Predicting the Gulf of Mexico Loop Current: Critical Gaps and Recommendations*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24823>
- Gallegos, A., Victoria, I., Zavala, J., Fernández, M., & Penié, I. (1998). Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental. *Revista de Investigaciones Marinas*, 19(1), 1–37.
- GEBCO. (2009). *Digital Bathymetry Atlas*. British Oceanographic Data Center, Intergovernmental Oceanographic Commission, International Hydrographical Organization, Environment Research Council.
- HYCOM. (2022). *HYbrid Coordinate Ocean Model at the U. S. Global Ocean Data Assimilation Experiment*. HYCOM. <https://hycom.org/>

- INSMET. (2023). *Resúmenes de Temporadas Ciclónicas*. Instituto de Meteorología. <http://www.insmet.cu>
- Meunier, T., Pallás-Sanz, E., Tenreiro, M., Portela, E., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., & Cusi, S. (2018). The Vertical Structure of a Loop Current Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6070–6090. <https://doi.org/10.1029/2018JC013801>
- Meunier, T., Pérez-Brunius, P., & Bower, A. (2022). Reconstructing the Three-Dimensional Structure of Loop Current Rings from Satellite Altimetry and In Situ Data Using the Gravest Empirical Modes Method. *Remote Sensing*, 14(17), 4174. <https://doi.org/10.3390/rs14174174>
- Meunier, T., Sanz, E. P., Tenreiro, M., Ochoa, J., Angulo, A. R., & Buckingham, C. (2019). Observations of Layering under a Warm-Core Ring in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(12), 3145–3162. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0138.1>
- Mitrani Arenal, I., Cabrales Infante, J., & Alonso Díaz, Y. (2020). Valoración de la influencia de la circulación oceánica y el aporte de los ríos Sudamericanos en la actividad ciclónica, utilizando los re-análisis HYCOM. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(4). <https://eqrcode.co/a/ZdN0A0>
- Mitrani, I. (2017a). *Meteorología Marina*. Instituto de Meteorología/Agencia de Medio Ambiente/Casa CITMA^{TEL}. <https://www.citmatel.inf.cu>
- Mitrani, I., García, E., Hidalgo, A., Hernández Baños, I., Salas, I., Pérez, R., Díaz, O. O., Vichot, A., Pérez, A., Cangas, R., Alvarez, L., Pérez, O. E., Rodríguez, C. M., Pérez, A. L., Morales, A., Viamontes, J., Pérez, J., & Rodríguez, J. A. (2017). *Las inundaciones costeras en Cuba: Influencia de la estructura termohalina en las inundaciones*. Instituto de Meteorología/Agencia de Medio Ambiente/Casa CITMA^{TEL}. <https://www.citmatel.inf.cu>
- Mitrani-Arenal, I., & Díaz, O. (2008). Particularidades de la estructura termohalina y sus tendencias en aguas Cubanas. *Revista Cubana de Meteorología*, 14(1), 54–73. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/278>
- NHC (National Hurricane Center). (2023). *National Hurricane Center Archive*. <https://www.nhc.noaa.gov/data>
- Pierce, D. W. (2017). *Ncview 2.1.8, David W. Pearce 8 March 2017*. University of California. http://meteora.ucsd.edu:80/~pierce/ncview_home_page.html
- Rivero Ordaz, L., Arriaza Oliveros, L., Sánchez Pérez, E. O., Athié, G., Carrillo Betancourt, Y., Ochoa de La Torre, J. L., Candela Pérez, J., Sheinbaum, J., & Hernández Gonzalez, M. (2022). Variabilidad espacio-temporal de la Corriente de Yucatán en el periodo 2012-2018 y la influencia del evento ENOS (2015-2016). *Revista Cubana De Meteorología*, 28(3), e11. <https://cu-id.com/2377/v28n3e11>
- Simanca, J., Ramírez, O., Fernández, L., Arriaza, L., Rodas, L., Sponda, S., García, R., Alburquerque, O., & García, I. (2012). Variabilidad de las corrientes marinas en el Canal de Yucatán: “Lado Cuba”. *Contracorriente cubana, Primera Parte. Serie Oceanológica*, 10, 1–10. <http://hdl.handle.net/1834/6696>