

Variabilidad espacio-temporal de la Corriente de Yucatán en el periodo 2012-2018 y la influencia del evento ENOS (2015-2016)



<https://cu-id.com/2377/v28n3e11>

Space-time variability of the Yucatan Current during the period 2012-2018 and the influence of the ENSO event (2015-2016)

 Laura Rivero Ordaz¹,  Liliam Arriaza Oliveros²,  Enrique O. Sánchez Pérez³,  Gabriela Athié⁴,
 Yudelsy Carrillo Betancourt⁵,  Jose Luis Ochoa de La Torre⁶,  Julio Candela Pérez⁶,
 Julio Sheinbaum⁶,  Marcelino Hernández González²

¹Grupo de Física de la Atmósfera (GFA), Instituto de Medio Ambiente (IMA), Universidad de León (ULE), España.

²Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR), La Habana, Cuba.

³Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

⁴Cátedra CONACYT -Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana, México.

⁵Instituto de Geografía Tropical (IGT), La Habana, Cuba.

⁶Centro de Investigaciones Científicas y Educación Superior, Ensenada (CICESE), Baja California, México.

RESUMEN: La corriente de Yucatán fluye en dirección norte, sobre el lado occidental del canal que se denomina con el mismo nombre, el cual es la única conexión entre el golfo de México y el mar Caribe. En este trabajo se caracterizó la corriente de Yucatán y se estimó su variabilidad espacio-temporal en un periodo de seis años (2012-2018), para esto se utilizaron los datos de los anclajes oceanográficos YUC5, ubicados en este canal sobre la trayectoria de la corriente de Yucatán. Las series de datos fueron filtradas para conservar las frecuencias subinerciales, se efectuó un análisis estadístico y se obtuvieron rosas de corriente de 16 rumbos. Los resultados hallados complementan investigaciones anteriores sobre la variabilidad de la corriente de Yucatán y las aguas oceánicas regionales. Además, se hallaron anomalías de la magnitud de la corriente de Yucatán con una periodicidad de aproximadamente dos años. Las anomalías mensuales de la rapidez de la corriente de Yucatán y las de temperatura superficial del mar (TSM), que son indicadores del ONI (*Oceanic Niño Index*), fueron comparadas durante el evento de ENOS, que presentó categoría fuerte (+2,6°C) entre 2015-2016. A pesar de que estas variables no mostraron una relación directa, se encontró una correlación alta por encima de 0,7 y estadísticamente significativa, que presenta una relación inversa entre ambas series, con un desfase de 5 a 6 meses. El estudio de esta área aportó información acerca de la circulación y la conectividad dinámica existente entre las aguas adyacentes, así como la interrelación océano-atmósfera.

Palabras Claves: corriente de Yucatán, variabilidad espacio-temporal, ENOS.

ABSTRACT: The Yucatan current flows northward, on the western side of the channel with the same name, which is the only connection between the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea. In this work, the Yucatan current was characterized and its spatio-temporal variability was estimated using six years (2012-2018) of direct measurements, for which three oceanographic moorings located at this channel and over the Yucatan current path were used. The data series were band-pass filtered to conserve the subinertial frequencies, a statistical analysis was carried out and current roses of 16 courses were obtained. The results found here are complementary with previous research about Yucatan current variability and on regional ocean waters. In addition, average anomalies that indicate a periodicity of approximately two years were found. The monthly anomalies of the speed of the Yucatan current and those of sea surface temperature, obtained from the ONI, were compared during the ENSO event, which presented a strong category (+2,6°C) between: 2015-2016. These variables did not show a direct connection, however, a significant and high correlation above 0.7 was found, which showed an inverse relationship between both series with a lag of 5 or 6 months. This study provides important information about the circulation and dynamic connectivity existing between adjacent waters, as well as the ocean-atmosphere interrelation.

Keywords: Yucatan stream, space-time variability, ENSO.

*Autor para correspondencia: Laura Rivero Ordaz. Email: laurivordaz@gmail.com

Recibido: 15/05/2022

Aceptado: 02/08/2022

INTRODUCCIÓN

Las corrientes marinas distribuyen energía y transportan materia; a su vez influyen en las condiciones climáticas, la biodiversidad marina y la trayectoria de diferentes partículas. El sistema de corrientes a través del canal de Yucatán, única conexión entre el golfo de México y el mar Caribe, constituyen una componente importante de la circulación del giro subtropical del Atlántico Norte, junto a las aguas adyacentes a Cuba lo que se denomina como Mediterráneo Americano (mar Caribe y el golfo de México).

La corriente de Yucatán fluye en dirección norte sobre el lado occidental del canal, que se denomina con el mismo nombre (Maul *et al.*, 1985 y Sheinbaum *et al.*, 2002). Los valores máximos de rapidez de la corriente están por encima 2,0 m/s y tiene una magnitud promedio entre 1 y 1,5 m/s cerca de la superficie (Sheinbaum *et al.*, 2002; Abascal *et al.*, 2003; Ochoa *et al.*, 2003). La posición de su punto de máxima rapidez, es decir el núcleo de la corriente, se encuentra en la mitad occidental de este canal (Candela *et al.*, 2019) y está relacionada con el adentramiento de esta corriente en el golfo de México y con la formación y desprendimientos de los remolinos de la corriente del Lazo. Se caracteriza por tener un ancho entre 50 y 100 km (Abascal *et al.*, 2003; Bunge *et al.*, 2002).

Aproximadamente a 1200 m de profundidad, por debajo de la corriente de Yucatán, existe un flujo hacia el sur de 300 m de ancho, que se extiende de forma intermitente por debajo de los 800 m de profundidad y hasta el fondo (Sheinbaum *et al.*, 2002; Abascal *et al.*, 2003; Ochoa *et al.*, 2003). Por otra parte, Abascal *et al.* (2003) encuentran también un flujo subsuperficial con dirección sur, en el límite occidental de la corriente de Yucatán, que se presenta de forma intermitente por encima de los 500 m de profundidad y afirman que este flujo se encuentra próximo al quiebre de la plataforma de Yucatán. Se ha discutido que dicho flujo podría ser una parte importante del mecanismo de afloramientos del Banco de Campeche (Merino, 1997).

La circulación en el canal de Yucatán tiene una gran variabilidad, Candela *et al.* (2019) encuentran un transporte promedio de 27,6 Sv (1 Sv = 10^6 m³/s) entre 2012 y 2016, el cual es muy cercano a los 27,1 Sv encontrados por Athié *et al.* (2015) entre 2010 y 2011. Previamente Ochoa *et al.* (2003) calcularon un transporte promedio de 22,8 Sv para el periodo de 1999 - 2001; este transporte es menor al observado durante otros periodos de mediciones y al obtenido con modelos, debido a una fuerte variabilidad interanual estimada en 5 Sv con datos de altimetría (Athié *et al.*, 2015). En el 2010, Rousset y Beal estimaron la variabilidad interanual del transporte en la zona de 2 Sv, encontrando también que la corriente es más rápida en verano, mientras que en primavera y otoño se vuelve más lenta. Este ciclo estacional representa el

25% de la varianza subinercial del transporte a través del canal; sin embargo, cuando se analiza la variabilidad estacional del transporte aportado únicamente por la corriente de Yucatán, solo representa el 6% de la varianza subinercial de la corriente (Athié *et al.*, 2020).

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un evento de variabilidad climática a escala global asociado con la interacción océano-atmósfera. Este se desarrolla en una escala interanual y su nombre indica la presencia de dos componentes: atmosférica y oceánica. La Oscilación del Sur es la componente atmosférica, asociada con fluctuaciones de dos sistemas de presión a gran escala, el sistema de bajas presiones en Darwin y el anticiclón de Tahití. Por otro lado, la componente oceanográfica (El Niño/ La Niña) indica calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial. Estas variaciones traen consigo alteraciones significativas en los patrones climáticos de distintas zonas del planeta (Maturana *et al.*, 2004). Según Pérez *et al.* (2012), este evento es el principal factor forzante de la variabilidad climática conocido hasta el momento y una parte muy importante de la variabilidad interanual de los elementos climáticos en Cuba es explicada por su ocurrencia. Durante el 2015 y 2016, años comprendidos en el período de estudio, ocurrió un episodio de este evento y alcanzó la categoría de fuerte (Niño, +2,6°C).

Por todo lo antes expuesto, el objetivo general de este trabajo es caracterizar la corriente de Yucatán y estimar su variabilidad espacio-temporal en un periodo de seis años desde agosto de 2012 hasta julio de 2018. Además, se pretende estudiar qué relación guarda la ocurrencia del ENOS con el comportamiento de dicha corriente y así aportar información acerca de la circulación, la conectividad dinámica y la interrelación océano-atmósfera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El canal de Yucatán tiene aproximadamente 196 km de ancho, desde cabo de San Antonio, Cuba hasta la isla Contoy, México, cuenta con un umbral de 2040 m de profundidad. En su extremo occidental, frente a cabo Catoche y sobre la península Yucateca, la pendiente del fondo es suave y cae sobre una plataforma continental bastante amplia, ubicada al noroeste del estrecho (Figura 1).

Datos utilizados

Se utilizaron los datos generados por el programa de mediciones oceanográficas del proyecto "Canek", que desarrolla el Centro de Investigaciones Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, México (CICESE), gracias a una estrecha colabora-

ción científica a largo plazo, formalmente establecida mediante un convenio de colaboración científica bilateral entre la mencionada institución y el Instituto de Ciencias del Mar en Cuba (ICIMAR).

En el período analizado, desde junio de 2012 a julio de 2018, se instalaron diez anclajes durante 5 crueros oceanográficos (Tabla 1), los cuales realizaron mediciones de velocidad en toda la columna de agua, con una duración de aproximadamente un año, con excepción del último crucero Canek 42, en el que se contó con dos años continuos de mediciones. Estas mediciones permitieron la obtención de series interanuales continuas de corrientes marinas, a diferentes profundidades, de acuerdo al transepto diseñado para el canal de Yucatán (Figura 1). Entre cada una de las mediciones se contó con periodos de mantenimiento durante algunos días en el verano, pudiéndose completar de esta forma seis intervalos de 12 meses cada uno, desde el mes de agosto al mes de julio del siguiente año (Tabla 1).

Procesamiento de los datos y métodos estadísticos empleados

Se utilizaron perfiladores acústicos por efecto Doppler para medir las corrientes marinas (*Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP*) y correntómetros de la marca Anderaa, de un nivel. Los ADCPs tienen la capacidad de proporcionar un perfil de la velocidad (magnitudes y direcciones) de las corrientes marinas en la columna de agua, que se efectuó hasta los 500 m de profundidad. Las mediciones de profundidad se obtuvieron primariamente cada 8, 10 y 16 m (se tomaron en cada caso profundidades cercanas, aproximada-

mente cada 16 m) y el intervalo de muestreo de los equipos fue de una hora. Los datos empleados tienen una alta fiabilidad, excepto algunas series que muestran errores de medición, y que representan menos del 20% del total, con equipos que registraron periodos de mediciones menores de seis meses. En esta investigación se consideraron inicialmente los anclajes YUC4, YUC5 y YUC15 de los 10 anclajes ubicados en el canal de Yucatán (Figura 1), ya que son los más representativos de la corriente y donde se encuentra aproximadamente la posición de su máximo de rapidez, es decir su núcleo (Candela *et al.*, 2019). Inicialmente, se llevó a cabo un pre-procesamiento de los tres anclajes para eliminar periodos o profundidades con datos erróneos o sin datos. La serie YUC15 (Figura 1) fue descartada para el análisis debido a que no presentó una calidad suficiente. Los cálculos básicos y gráficos, se realizaron con códigos computacionales desarrollados por los autores, en Matlab 2017.

Se realizó un análisis estadístico frecuencial de las series (YUC4 y YUC5) de las mediciones de Canek 39 y 42; mediante la elaboración de rosas de corriente con 16 rumbos de dirección en cada profundidad. Las coordenadas de cada anclaje y los equipos que se encuentran en estas posiciones a determinadas profundidades, se muestran en la tabla 2.

Se determinó que la posición de YUC5 es la que mejor caracteriza el núcleo de la corriente de Yucatán durante la serie completa (agosto de 2012 a julio de 2018). Los datos de este anclaje fueron filtrados, se utilizó el filtro pasa-banda de Lanczos (Emery y Thomson, 2014) con frecuencias de corte de 40 hr⁻¹ para remover las oscilaciones de marea, las inerciales y otras altas frecuencias (Abascal *et al.*, 2003 y Can-

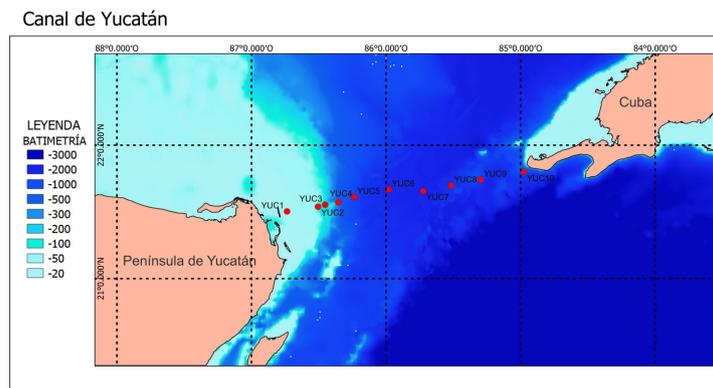


Figura 1. Batimetría de la región del canal de Yucatán, con la ubicación de los anclajes oceanográficos (de YUC1 a YUC10). Anclajes utilizados en este estudio YUC4, YUC15, YUC5.

Tabla 1. Período de las mediciones de las corrientes marinas analizadas en el presente trabajo.

Cruceros	Período de medición	Periodos analizados (agosto-julio)
Canek 29	junio 2012 - junio 2013	agosto 2012 - julio 2013
Canek 34	junio 2013 - julio 2014	agosto 2013 - julio 2014
Canek 37	julio 2014 - julio 2015	agosto 2014 - julio 2015
Canek 39	julio 2015 - agosto 2016	agosto 2015 - julio 2016
Canek 42	agosto 2016 - julio 2018 (2 años)	agosto 2016 - julio 2017 agosto 2017 - julio 2018

dela et al., 2003). Se realizó un análisis estadístico para la serie filtrada (2012-2018), mediante los estadígrafos: mínimo, máximo, media y desviación estándar. Además, se confeccionaron rosas de corrientes del periodo completo.

Se calcularon anomalías de la magnitud de la corriente de Yucatán con los datos filtrados del anclaje YUC5, con el propósito de caracterizar la variabilidad de su rapidez; considerando los periodos de estudio (Tabla 1) y años calendario (de enero a diciembre). Se empleó la clasificación de las masas de agua del Atlántico Mediterráneo, para unificar profundidades con comportamiento hidrológico similar. En la vertical se promediaron dos capas, una superficial entre 90 m y 234 m y otra más profunda entre 250 y 410 m.

Se realizó una comparación entre las anomalías mensuales de las corrientes (YUC5) obtenidas para los años 2014, 2015 y 2016, con las anomalías de TSM determinadas por el ONI que representan la componente oceánica del evento y muestran episodios cálidos o fríos basados en el umbral de $\pm 0,5$ °C (Tabla 3); cuando dicho umbral es cubierto durante un mínimo de cinco meses consecutivos, se definen como episodios de El Niño o La Niña (NOAA, 2021). El ONI es obtenido a partir de la media móvil de 3 meses consecutivos de anomalías de TSM medidas por el sensor ERSST.v3 en la región 3,4 del Niño (5°N - 5°S, 120° - 170°W).

Se utilizó el método paramétrico de correlación lineal de Pearson para hallar la asociación simultánea que existe entre los periodos de mediciones continuas. Posteriormente se realizó la correlación cruzada con este mismo coeficiente para cuantificar la asociación entre las anomalías mensuales del ONI y la rapidez de la corriente de Yucatán y determinar el desfase correspondiente entre las series. Se utilizó un año de desfase (2014), mientras se correlacionaron los años

2015, 2016 y 2017 (36 meses). Se determinó si el coeficiente de correlación cruzada era estadísticamente significativo al 95% de confianza, mediante la siguiente ecuación 1, de acuerdo con (Guevara, 2014):

$$r(k) > \frac{1,96}{\sqrt{N-k}}$$

Donde k es el valor absoluto del desfase N es el número de datos y $\frac{1}{\sqrt{N-k}}$ es el Error Estándar de r(k).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las corrientes marinas en la mitad occidental del canal de Yucatán, entre 2015 y 2018

La distribución frecuencial tuvo un comportamiento similar en las profundidades más cercanas a la superficie, como referencia 96 m (YUC4) y 90 m (YUC5). La dirección preferencial fue hacia el norte y noreste, con valores de magnitud máximos por encima de 1,80 m/s; sin embargo, en YUC5 las frecuencias de ocurrencia fueron superiores con respecto a YUC4 (próximas al 50% con rumbo norte). Por debajo de los 400 m de profundidad se observó una fuerte variabilidad de la corriente, con un comportamiento muy diferente para cada una de estas ubicaciones, se tomó como referencia las profundidades de 416 m (YUC4) y 410 m (YUC5). En el anclaje YUC4 hubo una alta dispersión en la dirección de la corriente; los rumbos con mayor frecuencia de ocurrencia entre 12 y 15% fueron de componente sur y sur-suroeste, respectivamente; con una magnitud máxima próxima a 0,40 m/s. En YUC5 el rumbo predominante fue hacia el norte y la máxima magnitud alcanzada estuvo en el rango de 0,60 y 0,80 m/s, con una frecuencia ligeramente superior al 40%.

En aguas más profundas por debajo de 981 m (YUC5), la dirección predominante fue hacia el sur

Tabla 2. Posición de los anclajes y características de los equipos: se especifica la cantidad de equipos instalados, la profundidad de instalación y su orientación, es decir, si se encontraban midiendo hacia abajo o hacia arriba en la columna de agua.

Anclajes	Lon. (°W)	Lat. (°N)	ADCPs profundidad (m) y orientación	Correntómetro profundidad (m)	Cantidad de profundidades empleadas
YUC5	-86.235	21.614	1 (arriba, 499)	3 (981,1080 1190)	21
YUC4	-86.355	21.573	1 (arriba, 489)	-----	26

Tabla 3. Índice *Oceánico El Niño* (ONI). Se indican los periodos trimensuales correspondientes a La Niña (azul), El Niño (rojo) y meses neutrales (negro).

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2012	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	-0,2
2013	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7
2015	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,5	2,6
2016	2,5	2,2	1,7	1,0	0,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	-0,1	0,4	-0,7	-0,9	-1,0
2018	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	0,8

Fuente: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_1971-2000_climo.shtml

con una frecuencia del 25% y una rapidez máxima entre 0,20 y 0,40 m/s. Lo cual coincide con varios autores que afirman la existencia de flujos hacia el sur en las aguas más profundas del canal de Yucatán, como una compensación por la diferencia de profundidad entre este canal, el golfo de México y el estrecho de la Florida (Maul y Vukovich, 1993; Merino, 1997; Carrillo, 2001; Bunge *et al.*, 2002 y Ochoa *et al.*, 2003).

El análisis del comportamiento medio y temporal de las corrientes marinas, según las mediciones realizadas en los dos anclajes permite considerar que las magnitud en YUC5 entre agosto de 2015 y julio de 2018 coinciden con el comportamiento esperado de la corriente de Yucatán, según estudios realizados y además el núcleo se encontró con mayor frecuencia cerca de esta posición. La variabilidad en la posición del núcleo podría estar asociada no solo a los giros ciclónicos que llegan hasta el canal de Yucatán y pueden llegar a cruzarlo (Athié *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2021), sino también a procesos con escalas temporales de más de dos años.

La corriente de Yucatán entre agosto 2012 y julio 2018

El análisis estadístico de la rapidez de la corriente de la serie completa entre agosto de 2012 y julio de 2018 dio valores mínimos muy próximos a cero para cada profundidad analizada. Aunque al separar las series por periodos de estudios, estos alcanzaron valores próximos a 0,5 m/s por encima de los 150 m de profundidad, lo que se corresponde con la relativa cercanía de la posición fija del anclaje YUC5 al núcleo de la corriente. Los valores máximos superaron los 2 m/s hasta los 100 m de profundidad y los valores medios estuvieron en el rango entre 0,95 m/s y 0,23 m/s

desde 90 hasta 410 m, respectivamente. La mayor incertidumbre ocurrió en la medición más cercana a la superficie (una desviación estándar de 0,36 m/s en 90 m de profundidad) y disminuye en función de la profundidad (0,14 m/s en 410 m), en correspondencia con la alta variabilidad del océano que está asociada a su interacción con la atmósfera.

La corriente de Yucatán en el periodo completo (2012-2018), desde 90 hasta 410 m de profundidad (YUC5), registró los valores máximos de rapidez por profundidad entre 2015 y 2018 (Tabla 4). Esto indica que los valores más elevados de magnitud de la corriente de Yucatán se produjeron fundamentalmente en la segunda mitad del periodo de estudio. El máximo de rapidez fue aproximadamente 2,04 m/s a 90 m (profundidad analizada más cercana a la superficie).

La ocurrencia de valores máximos de rapidez, pudieran estar relacionados en algunos casos con sistemas meteorológicos. El 28 de mayo de 2018, se produjeron máximos en diferentes profundidades desde 170 hasta 282 m, fecha posterior al paso de la Tormenta Subtropical Alberto por esta área (Bravo, 2018). Por otro lado, los meses de mayor ocurrencia de frentes fríos anualmente es el periodo de noviembre a marzo, de acuerdo con la climatología realizada entre 1981 y 2010; hasta la fecha Pascual *et al.* (2019), el periodo noviembre-marzo de la temporada 2015-2016 había sido el más activo con 42 sistemas. En correspondencia, los valores máximos de rapidez de la corriente en los niveles más profundos ocurrieron durante dicha temporada, en noviembre de 2015. En general, la intensa actividad frontal puede generar oleaje, intensa mezcla turbulenta vertical de las aguas, así como pulsos de velocidad asociados a ondas atrapadas a la costa en el golfo de México que llegan hasta el canal de Yucatán (Jouanno *et al.*, 2016).

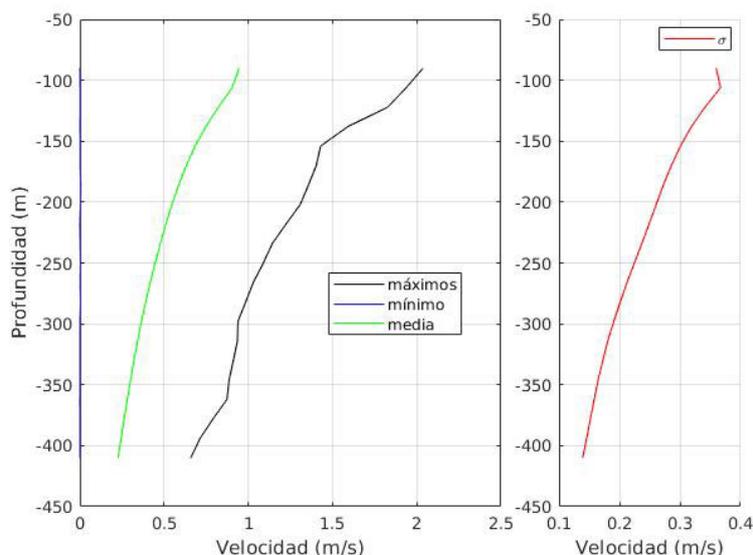


Figura 2. Comportamiento vertical de la corriente de Yucatán: media, desviación estándar (σ), máximo y mínimo (2012-2018, en YUC5).

La corriente de Yucatán alcanzó durante el periodo 2016-2017 una magnitud promedio máxima de 1,17 m/s en los 90 m de profundidad, que es el nivel analizado más próximo a la superficie oceánica (Tabla 5). En la misma tabla, se puede apreciar que la magnitud de la corriente de Yucatán, no manifestó para cada uno de los seis periodos analizados entre el 2012 y el 2018, una alta variabilidad temporal con respecto a su valor medio, destacándose la similitud del valor de la desviación estándar ($\sigma=0,35$) del periodo 2015-2016 y del obtenido para los seis periodos en su conjunto de ($\sigma=0,36$), entre el 2012 y el 2018. La desviación estándar por periodos presenta un comportamiento muy cercano a la variación del periodo completo.

Se encontró una correlación lineal de baja a moderada entre la serie de corriente marina de los seis periodos de estudio (Tabla 6). El coeficiente de Pearson estuvo entre -0,39 y 0,38, lo que demuestra la fuerte variabilidad de la corriente e indica menor correspondencia con respecto a cambios estacionales

(Athié *et al.*, 2020). El periodo 2012-2013 mostró la correlación más alta con el resto de los periodos, mayormente de relación inversa. Mientras que el periodo 2016-2017 tuvo los valores más bajos de correlación, lo que podría asociarse con un comportamiento ligeramente más variable con respecto a los otros periodos.

Por otro lado, desde agosto 2012 hasta julio 2018 en las profundidades analizadas (90-410 m) la dirección predominante de la corriente de Yucatán fue hacia el norte y en menor medida movimientos hacia el norte-noreste (Figura 3). La frecuencia de ocurrencia de las máximas magnitudes con rumbo norte, oscilaron entre el 50 y el 60%. La magnitud media del periodo completo 2012-2018 varió según la profundidad, a 90 m estuvo entre 1,80 y 2,00 m/s, a 250 m se registraron valores entre 0,80 y 1,00 m/s y para la mayor profundidad (410 m) se hallaron entre 0,40 y 0,60 m/s, lo que indica una reducción en la rapidez del flujo de alrededor de 70% entre los 90 y los 400 m de profundidad.

Tabla 4. Valores máximos de rapidez de la corriente de Yucatán (2012-2018, en YUC5) conforme aumenta la profundidad (de izquierda a derecha).

Prof. (m)	Valor (m/s)	Fecha	Prof. (m)	Valor (m/s)	Fecha
90	2,04	19/08/2015	266	1,03	28/05/2018
106	1,94	19/04/2017	282	0,98	28/05/2018
122	1,83	19/04/2017	298	0,94	28/11/2016
138	1,59	20/04/2017	314	0,93	11/11/2015
154	1,43	03/05/2017	330	0,91	11/11/2015
170	1,40	28/05/2018	346	0,89	11/11/2015
186	1,36	28/05/2018	362	0,87	11/11/2015
202	1,31	28/05/2018	378	0,79	11/11/2015
218	1,22	28/05/2018	394	0,71	11/11/2015
234	1,14	28/05/2018	410	0,66	24/11/2015
250	1,09	28/05/2018	-	-	-

Tabla 5. Rapidez de la corriente de Yucatán a 90 m de profundidad para el anclaje YUC5.

Períodos	Máximo (m/s)		Media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
	Valor	Fecha		
2012-2013	1,42	22/01/2013	0,75	0,31
2013-2014	1,50	10/07/2014	0,55	0,26
2014-2015	1,82	16/11/2014	1,11	0,26
2015-2016	2,04	19/08/2015	1,02	0,35
2016-2017	1,87	19/04/2017	1,17	0,26
2017-2018	1,72	21/07/2018	1,07	0,24
2012-2018 (6 años)	2,04	19/08/2015	0,95	0,36

Tabla 6. Matriz de correlación lineal de Pearson, anclaje YUC5.

Períodos	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018
2012-2013	-----	-0,32	-0,39	-0,24	0,11	-0,33
2013-2014	-0,32	-----	0,30	0,10	-0,12	0,10
2014-2015	-0,39	0,30	-----	0,08	0,08	0,38
2015-2016	-0,24	0,10	0,08	-----	-0,13	0,12
2016-2017	0,11	-0,12	0,08	-0,13	-----	0,13
2017-2018	-0,33	0,10	0,38	0,12	0,13	-----

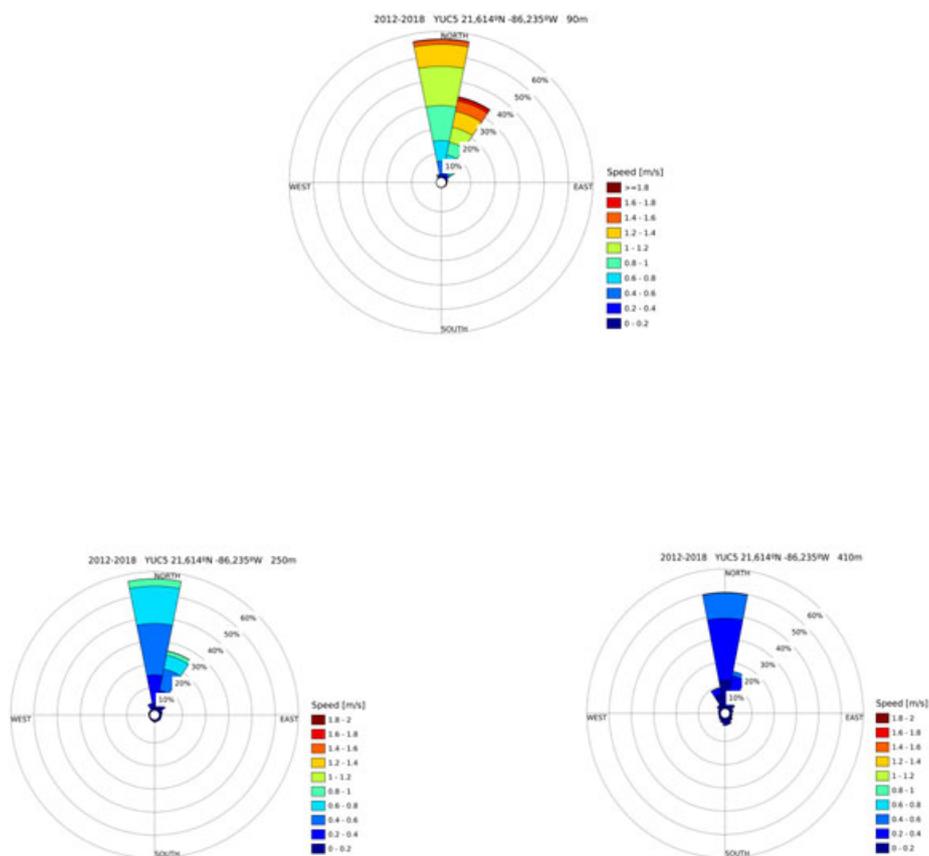


Figura 3. Distribución frecuencial de la magnitud y dirección de la corriente de Yucatán. a) 90 m, b) 250 m y c) 410 m.

Anomalías de la corriente de Yucatán y su relación con el ENOS

Las anomalías de la magnitud de la corriente de Yucatán, calculadas para cada periodo de estudio (Tabla 1) se observan en la figura 4a. Entre 90 y 234 m, las anomalías fueron negativas en los periodos 2012-2013, y 2013-2014 (-0,14 y -0,24 m/s, respectivamente) lo que muestra una disminución de la magnitud de la corriente de Yucatán, con respecto al promedio de los seis años. En el periodo 2014-2015 la anomalía fue positiva (0,05 m/s), esto representa un incremento significativo en la magnitud de la corriente con respecto al periodo anterior. La anomalía fue negativa nuevamente en el periodo 2015-2016 (-0,01 m/s) pero inferior en valor absoluto a la calculada para los periodos precedentes; lo cual supone un nuevo descenso de dicha magnitud. Entre 2016 y 2017 la anomalía fue positiva y la mayor registrada durante el periodo de estudio (0,21 m/s). En el último periodo 2017-2018 la anomalía continuo positiva, pero con un valor menor (0,14 m/s). En las profundidades mayores de 250 y hasta 410 m, las anomalías de cada periodo se correspondieron en cuanto a su signo con las obtenidas en las profundidades entre 90 y 234 m, solo que con valores absolutos menores;

excepto en el periodo 2015- 2016 (-0,05 m/s). De manera general la magnitud de la corriente de Yucatán, según las anomalías calculadas presentó su mayor disminución en el periodo 2013- 2014 y el mayor aumento entre 2016 y 2017. Las anomalías indican un cambio brusco en la magnitud de esta corriente durante el periodo 2014-2015 y un patrón de descenso y ascenso que se repite cada dos años (Figura 4a).

Se calcularon también las anomalías anuales o años calendarios (Figura 4b), para los años desde 2013 hasta 2017. Desde 90 hasta 234 m, en los primeros dos años 2013 y 2014 hubo tendencia a la disminución de la rapidez de la corriente con valores (-0,11 y -0,22 m/s). El mayor valor en magnitud se obtuvo en 2014, resultado que coincide con el periodo de estudio 2013-2014, esto permite inferir que los picos anómalos negativos ocurrieron en el primer semestre de 2014 (Tabla 7). Los años 2015, 2016 y 2017 tuvieron anomalías positivas (0,08, 0,01 y 0,23 m/s respectivamente), este último valor en el 2017 demuestra un aumento en la rapidez superior al resto de los años, resultado similar al obtenido en el periodo de estudio 2016-2017. En el primer semestre de este último año se observaron los valores positivos más significativos respecto a la media (Tabla 7). En las mayores profundidades de 250 a 410 m, las anomalías muestran un

comportamiento similar a los niveles menos profundos, con valores menores en magnitud; excepto para el año 2016, con tendencia a la disminución de su rapidez (-0,03 m/s).

Las anomalías mensuales de la rapidez de la corriente de Yucatán desde agosto 2012 hasta julio de 2018 se muestran en la [tabla 7](#). Estos valores también se calcularon a mayores profundidades (250-410 m), sin embargo, no difieren de manera general en la tendencia de incremento o disminución de la rapidez, con respecto a las menores profundidades.

En 2014 las anomalías de la rapidez de la corriente de Yucatán fueron negativas en casi todos los meses del año, fundamentalmente en el primer semestre, excepto en los meses de verano. Mientras que, en 2015 hubo un predominio de valores mensuales positivos y se observó en el mes de agosto el pico extremo de anomalía positiva (0,42 m/s) de los cuatro años. El 2016 en su mayoría mostró tendencias a la disminución de la rapidez de la corriente, excluyendo los últimos meses del año. El 2017 presentó un predominio de anomalías positivas y los valores más elevados en el primer semestre con respecto al resto de años ([Tabla 7](#)). El comportamiento de las anomalías mensuales de la corriente de Yucatán en estos cuatro años ([Figura 5](#)), no se corresponde de manera simultánea con las anomalías mensuales de TSM observadas en la misma figura y en la [tabla 3](#) (Índice ONI).

Sin embargo, los resultados de la correlación cruzada entre ambas series de tiempo demuestran que existe una correlación mayor en sentido inverso con 5 y 6 meses de desfase, con ENOS antecedendo el cambio en rapidez de la corriente de Yucatán ([Tabla 8](#)); los coeficientes tienen valores estadísticamente significativos de -0,728 y -0,704 para estos dos desfases, respectivamente para un límite de confianza del 95% ([Ecuación 1](#)). En general, todos los coeficientes de correlación cruzada calculados con desfases entre 2 y 9 meses resultaron estadísticamente significativos y con valores de correlación negativos; lo que significa que las anomalías mensuales de la rapidez de la corriente de Yucatán ocurren con fases opuestas a la variabilidad mensual de la TSM en el Pacífico Tropical (positivas/ negativas), presentando una mayor correlación con un desfase de 5 o 6 meses, después de ocurrido un episodio de ENOS, por lo que se encuentran muy probablemente relacionadas dentro de un proceso complejo de interacción océano-atmósfera. Por tanto, este periodo de desfase, concuerda con el obtenido para la TSM de las aguas alrededor de Cuba, según [Hernández \(2002\)](#) al analizar las anomalías de TSM en dicha región y compararlas con las anomalías en la región Niño 3; se comprobó con seis eventos ENOS que las altas temperaturas del mar fueron correlacionadas significativamente de forma positiva con 5 y 6 meses de desfase. También [Palacios et al. \(2017\)](#)

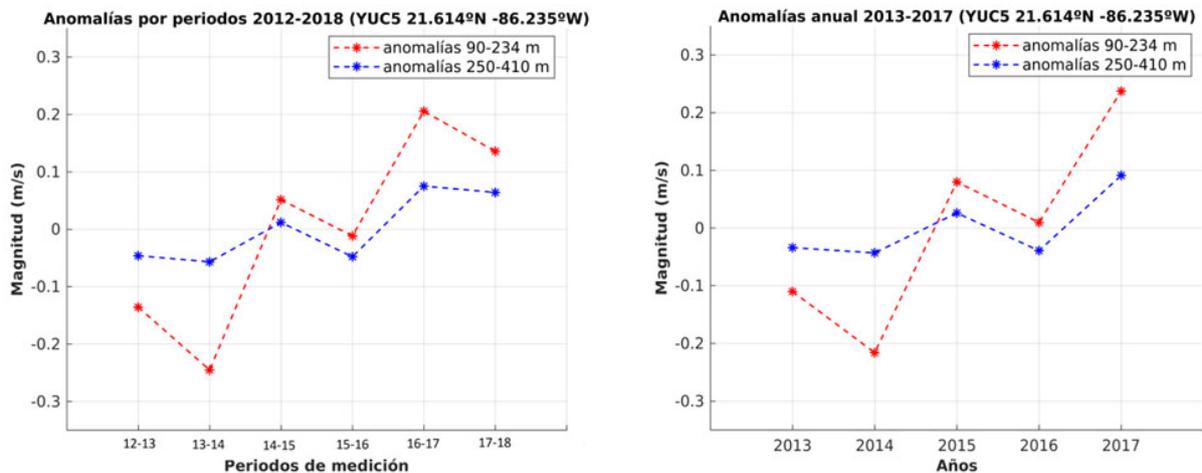


Figura 4. Anomalías de la rapidez de la corriente de Yucatán, promediadas en la vertical para la capa superior (90-234 m en rojo) e inferior (250-410 m) en la columna de agua. a) Anomalías por periodo de medición, b) Anomalías anuales desde el 2013 hasta el 2017.

Tabla 7. Anomalías mensuales de la rapidez de la corriente de Yucatán (YUC5) en la capa superior de la columna de agua (90- 234 m).

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2012	-	-	-	-	-	-	-	-0,40	-0,34	-0,03	0,22	0,05
2013	0,12	-0,09	-0,12	-0,11	0,04	0	-0,54	-0,16	-0,43	-0,17	-0,14	-0,23
2014	-0,30	-0,34	-0,17	-0,28	-0,41	-0,36	0,06	0,16	0,21	-0,19	-0,01	-0,01
2015	0,06	-0,02	-0,02	0,05	0,13	0,04	0,23	0,42	0,17	0,08	0,11	-0,12
2016	-0,13	0,10	-0,12	-0,34	-0,29	-0,09	-0,01	-0,27	0,24	0,33	0,05	0,29
2017	0,12	0,23	0,23	0,39	0,29	0,42	0,26	0,24	0,16	-0,01	0,20	0,03
2018	0,12	0,13	0,20	0,29	0,23	-0,01	-	-	-	-	-	-

establecieron el comportamiento climático de la TSM en el mar Caribe, así como su respuesta a eventos globales, obteniendo entre sus resultados que los eventos Niño/Niña presentan correlación con esta área, con un desfase de 4 a 5 meses.

La relación inversa entre la magnitud de la corriente de Yucatán y los eventos Niño/Niñas, se puede observar por el valor negativo del coeficiente de correlación; por ejemplo (Tablas 3 y 7), si se toma el pico de anomalía positiva del episodio Niño fuerte (ONI, +2,6 °C) reportada en diciembre de 2015, con cinco meses de desfase le corresponde una anomalía negativa de la corriente de Yucatán en mayo de 2016 (-0,29 m/s), lo que demuestra una disminución en la magnitud de dicha corriente durante ese mes. Mientras que, en noviembre de 2016, se observa el tercer mes con una anomalía de valor igual a -0,7 °C durante un episodio de Niña; en abril de 2017 se encuentra con un retardo de cinco meses una anomalía positiva de la corriente de 0,39 m/s, lo que indica un incremento en la rapidez de la corriente de Yucatán para dicho mes. Juárez-Águila *et al.* (2019) relacionó el transporte a través del canal de Yucatán con las anomalías de TSM en el Pacífico (región El Niño 3,4), en particular para un evento largo e intenso de La Niña durante 1999-2000 y encontraron una relación positiva entre los eventos ENOS y el transporte a través del canal, con un desfase de entre 3 y 5 meses. Dicho desfase coincide con el observado en este trabajo y es importante recordar, que un aumento en la magnitud de la corriente de Yucatán, no necesariamente corresponde a un aumento en la rapidez del transporte o gasto total a través de todo el canal de Yucatán, debido a la fuerte compensación que existe entre dicha corriente y las contracorrientes en el fondo y en el lado cubano del canal (Athié *et al.*, 2020). En consecuencia, la relación inversa entre las anomalías de TSM asociadas al ENOS en el Pacífico y la magnitud de la corriente de Yucatán, es un resultado importante e interesante de este trabajo que complementa las observaciones

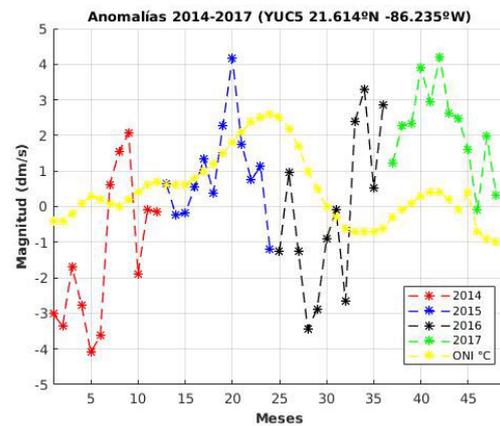


Figura 5. Anomalías mensuales (10 dm/s= 1 m/s, se emplearon estas unidades para lograr representar las anomalías en la rapidez de la corriente de Yucatán y el ONI (°C) en la misma gráfica) para los años desde 2014 hasta 2017.

previas y aporta bases para un mejor entendimiento del efecto del ENOS en la parte occidental del Océano Atlántico.

No todas las anomalías mensuales determinadas para la corriente de Yucatán cumplen con dicha condición, podrían corresponderse también con aumentos y descensos de la magnitud de la corriente por procesos rotatorios periódicos congruentes relacionados con gradientes espaciales de la densidad del agua de mar y de carácter oceánico. Estas variaciones están estrechamente vinculadas al comportamiento de la corriente del Lazo que provocan variaciones interanuales y entre periodos mayores en el transporte regional (Candela *et al.*, 2019); además a su vez influyen en la variabilidad espacial y temporal de las corrientes de Yucatán. No obstante, para afirmar que la conocida variabilidad interanual de dicha corriente (Rousset y Beal, 2010; Candela *et al.*, 2019) es incrementada por la influencia del ENOS se necesita un número mayor de años medidos con mediciones continuas para llegar a conclusiones más precisas.

Tabla 8. Correlación cruzada entre las anomalías de TSM (ONI) y las anomalías de la rapidez de la corriente de Yucatán (90-234 m) desde 2015 hasta 2017.

Retardo (meses)	Coefficiente de correlación (r)	Significación estadística
12 (un año)	0	0,400
11	-0,136	0,392
10	-0,270	0,384
9	-0,396	0,377
8	-0,522	0,370
7	-0,623	0,364
6	-0,704	0,358
5	-0,728	0,352
4	-0,695	0,346
3	-0,624	0,341
2	-0,465	0,336
1	-0,330	0,331
0 (lineal)	-0,157	0,327

CONCLUSIONES

- Se observó una magnitud promedio de la corriente de Yucatán de 1 m/s alrededor de los 100 m de profundidad, que junto al comportamiento temporal observado entre 2012 y 2018 coinciden con las observaciones históricas previas (1999-2012). La variabilidad en la posición del núcleo de la corriente está asociada con los giros ciclónicos que llegan hasta el canal de Yucatán y con procesos de escalas temporales de dos años aproximadamente.
- Los valores más elevados de magnitud de la corriente de Yucatán, 2 m/s aproximadamente, se produjeron fundamentalmente en la segunda mitad del periodo de estudio. Principalmente, en el año 2017 la corriente de Yucatán presentó un predominio de anomalías positivas y sus valores más elevados ocurrieron en el primer semestre. Lo cual pudiera estar relacionado con la ocurrencia de sistemas meteorológicos.
- Las anomalías mensuales de la rapidez de la corriente de Yucatán y la variabilidad mensual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico, podrían encontrarse relacionadas entre sí, como parte de un complejo proceso de interacción océano-atmósfera.
- La tendencia entre 2012 y 2018 de la magnitud de la corriente de Yucatán no evidencia su disminución. Este comportamiento temporal continúa en estudio actualmente.

REFERENCIAS

- Abascal, A. J., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J. y Badan A. (2003). Analysis of flow variability in the Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C12), 33-81. doi: [10.1029/2003JC001922](https://doi.org/10.1029/2003JC001922)
- Athié, G., Candela, J., Ochoa, J., y Sheinbaum J. (2012). Impact of Caribbean cyclones on the detachment of Loop Current anticyclones. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117 (C03018), 1-16. doi: [10.1029/2011JC007090](https://doi.org/10.1029/2011JC007090).
- Athié, G., Sheinbaum, J., Leben, R., Ochoa, J., Shannon, M. R. y Candela, J. (2015). Interannual variability in the Yucatan Channel flow. *Geophysical Research Letters*, 42, 1496-1503. doi: [10.1002/2014GL062674](https://doi.org/10.1002/2014GL062674).
- Athié, G., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J., Pérez-Brunius, P. y Romero-Arteaga, A. (2020). Seasonal Variability of the Transport through the Yucatan Channel from Observations. *Journal of Physical Oceanography*, 50, 343-360. doi: [10.1175/JPO-D-18-0269.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0269.1)
- Bravo, C. (2018). *Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2018*. México: CONAGUA. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2018.pdf>
- Bunge, L., Ochoa, J., Badan, A., Candela, J. y Sheinbaum, J. (2002). Deep flows in the Yucatan Channel and their relation to changes in the Loop Current extension. *Geophysical Research Letters*, 107 (C12), 3233, 1-7. doi: [10.1029/2001JC001256](https://doi.org/10.1029/2001JC001256)
- Candela, J., Tanahara, S., Crepon, M. y Barnier, B. (2003). The Yucatan Channel flow: Observations vs. CLIPPER ATL6 and MERCATOR PAM05 models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(C12), 3385, 1-24. doi: [10.1029/2003JC001961](https://doi.org/10.1029/2003JC001961).
- Candela, J., Ochoa, J., Sheinbaum, J., López, M., Pérez, P., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Athié, G. y Arriaza, L. (2019). The flow through the Gulf of Mexico. *Journal Physical Oceanography*, 49, 1381-1401. doi: [10.1175/JPO-D-18-0189.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0189.1).
- Carrillo, F. (2001). Caracterización de las corrientes de marea en el canal de Yucatán. Tesis de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física. CICESE. Ensenada, Baja California. México.
- Emery, W. J. y Thomson, R. E. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. doi: [10.1016/C2010-0-66362-0](https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0)
- Guevara, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra nueva etapa*, 30 (47), 79-102. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/721/72132516006.pdf>
- Hernández, B (2002). Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Investigaciones Marinas*, 30(2), 21-31. doi: [10.4067/S0717-71782002000200002](https://doi.org/10.4067/S0717-71782002000200002)
- Huang, M., Liang, X., Zhu, Y., Liu, Y. and Weisberg, R.H. (2021). Eddies Connect the Tropical Atlantic Ocean and the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 48, 1-10. doi: [10.1029/2020GL091277](https://doi.org/10.1029/2020GL091277).
- Jouanno, J., Ochoa, J., Pallas-Sanz, E., Sheinbaum, J., Andrade-Canto, F., Candela, J. y Molines, J.-M. (2016). Loop Current Frontal Eddies: Formation along the Campeche Bank and Impact of Coastally Trapped Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 46 (11), 3339-3363. doi: [10.1175/JPO-D-16-0052.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0052.1).
- Juárez-Águila, C., Athié, G., Méndez-Pérez, J.M., Sheinbaum, J. y Salas-Monreal, D. (2019). Análisis de la variabilidad interanual del flujo a través del canal de Yucatán con datos de satélite. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*. 36(2), 62-67. Recuperado de: <https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/16778/Cristhian%20%2862-67%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Maturana, J., Bello, M y Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. En Avaria, S., Carrasco, J., Rutllant, J. y Yáñez, E. (Ed.), *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*(pp.13-27). Valparaíso, Chile:Comité Oceanográfico Nacional.
- Maul, G. A., Mayer, D. A. y Baig, S. R. (1985). Comparison between a continuous three-year current meter observation at the sill of Yucatan Strait, satellite measurements of Gulf Loop Current area, and regional sea level. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C5),9089-9096. doi: [10.1029/JC090iC05p09089](https://doi.org/10.1029/JC090iC05p09089)
- Maul A. G. y Vukovich F. M. (1993). The Relationship between Variations in the Gulf of Mexico Loop Current and Straits of Florida Volume Transport. *Journal of Physical Oceanography*, 23, 785-796. doi: [10.1175/1520-0485\(1993\)023%3C0785:TRBVIT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023%3C0785:TRBVIT%3E2.0.CO;2)
- Merino, M. (1997). Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13 (1-4), 101-121. doi: [10.1016/S0924-7963\(96\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00123-6)
- NOAA (2021). *National Oceanic and Atmospheric Administration National Weather Service. Climate Prediction Center*. Estados Unidos: NOAA. Recuperado de: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_1971-2000_climo.shtml
- Ochoa, J., Badan, A., Sheinbaum, J. y Candela, J. (2003). CANEK: Measuring transport in the Yucatan Channel. En Velasco, O.U., Sheinbaum, J. y Ochoa J. (Ed.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics* (pp. 275-286). Kluwer Academic Publishers.
- Palacios, E., Carrillo, L., Meza, S.I, Ávalos, D. (2017). Variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar, en el Mar Caribe. *Ra Ximhai*, 13 (3), 243-265. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46154070014.pdf>
- Pascual, R., López, M., Chablé, L.A., Espejo, A. Z., Loranca, Y., Ledesma, J.I y Quintero, E. Y. (2019). *El Reporte del Clima en México. Reporte anual 2019*. México: CONAGUA.
- Pérez, R., Fonseca, C., Lapinel, B., González, C., González, I., Planos, E., Cutié, V., Mitrani, I., Aguilar, G., Carnesoltas, M., Ballester, M., Martínez, M., Vega, R., Vichot, A., Díaz, O., Pérez, A., Cangas, R., Alvarez, L., Morales, A., Viamontes, V. y Pérez, J. (2012). Variaciones y Cambios en el Clima. En Plano, E., Rivero, R. y Guevara, V. (Ed.), *Impacto del Cambio Climático y Medidas de adaptación en Cuba*(pp. 59-113). La Habana, Cuba: PNUD
- Rousset, C. y Beal, L. M. (2010). Observations of the Florida and Yucatan Currents from a Caribbean Cruise Ship. *Journal of Physical Oceanography*, 40 (7), 1575-1581. doi: [10.1175/2010JPO4447.1](https://doi.org/10.1175/2010JPO4447.1)
- Sheinbaum, J., Candela J., Badan A. y Ochoa J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, 29, (3), 1-4. doi: [10.1029/2001GL013990](https://doi.org/10.1029/2001GL013990).

Conflicto de intereses: Declaramos, no tener ningún conflicto de interés.

Contribución de Autoría: Laura Rivero Ordaz: **Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Visualización y Redacción - borrador original.** Liliam Arriaza Oliveros: **Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Software, Supervisión, Redacción - revisión y edición.** Enrique O. Sánchez Pérez: **Análisis formal, Software, Visualización.** Gabriela Athié: **Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Validación, Redacción - revisión y edición.** Yudelsy: **Carrillo Betancourt: Recursos, Visualización.** Jose Luis Ochoa de La Torre: **Curación de datos, Recurso, Validación, Redacción - revisión y edición.** Julio Candela Pérez: **Curación de datos, Administración del proyecto, Recursos.** Julio Sheinbaum: **Curación de datos, Administración del proyecto, Recursos.** Marcelino Hernández González: **Supervisión, Redacción - revisión y edición.**

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/)