

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA DINÁMICA OCEÁNICA SOBRE LA PLATAFORMA NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

GEMMA L. FRANKLIN,
MA. EUGENIA ALLENDE-ARANDÍA,
ALEJANDRO PALADIO Y J. A. KURCZYN

Introducción

En México las zonas costeras son de gran importancia para la economía del país, ya que ofrecen una gran diversidad de recursos ecosistémicos. El 46 % del territorio se encuentra en la franja costera, con un estimado de 55.4 millones de habitantes a la fecha y se espera que para 2050 la población aumente a 65 millones (Azuz-Adeath *et al.*, 2019). Por lo anterior, entender los procesos que ocurren a lo largo de la costa es imprescindible para poder implementar medidas de mitigación y adaptación en cualquier región, considerando que son regiones altamente vulnerables a los fenómenos naturales, al cambio climático, al crecimiento económico y al desarrollo antropogénico.

La costa norte de la Península de Yucatán se extiende aproximadamente 380 km desde Celestún hasta El Cuyo y sus principales actividades económicas están relacionadas con el turismo y la pesca comercial. En esta región la variabilidad atmosférica contribuye de manera significativa a la dinámica del océano debido a la baja topografía y a la gran extensión de su plataforma continental, ancha y somera. Estudios previos, como el de Torres-Freyermuth *et al.* (2017), han reportado que las corrientes en la zona costera están dominadas por el oleaje local generado por el viento, mientras que las corrientes oceánicas sobre la plataforma continental responden a la dinámica atmosférica de escala sinóptica. Por lo tanto, la dinámica oceánica y costera de mesoescala en la región peninsular está asociada a la Corriente de Yucatán, los cambios en el nivel medio del mar, la dinámica atmosférica a diferentes escalas espacio-temporales y al oleaje (Enriquez *et al.*, 2010; Torres-Freyermuth *et al.*, 2017; Kurczyn *et al.*, 2024).

La mayoría de los estudios previos sobre las corrientes en la región han sido experimentos de campo de menor escala espacial (p.e. Torres-Freyermuth *et al.*, 2017) o de modelos numéricos de mayor escala (p.e. Ruiz-Castillo *et al.*, 2016; Enriquez *et al.*, 2010). En este contexto y para poder comprender de manera integral la dinámica regional, este estudio tiene como

objetivo caracterizar la variabilidad de las corrientes costeras a diferentes escalas espaciales (regional y local) y temporales (horas y meses) a lo largo de la costa norte de la Península de Yucatán (Figura 1).

Para ello, se implementó el modelo hidrodinámico Delft3D (Lesser *et al.*, 2004) como herramienta numérica que simula corrientes y olas, promediado en la columna de agua debido a lo somero de la plataforma de Yucatán, y la variabilidad atmosférica regional. En la configuración del modelo se utilizaron datos de velocidad del viento (a 10 m de altura del reanálisis ERA5 [<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>]), datos de velocidad de la corriente superficial (modelo HYCOM [Halliwell Jr., 1998; Bleck, 2002; <https://www.hycom.org/data/gomu0pt04/expt-90pt1m000>]) y datos de oleaje (altura significativa, período de ola y dirección del modelo WAVEWATCH III [WWIII V.6.07; <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch3>]).

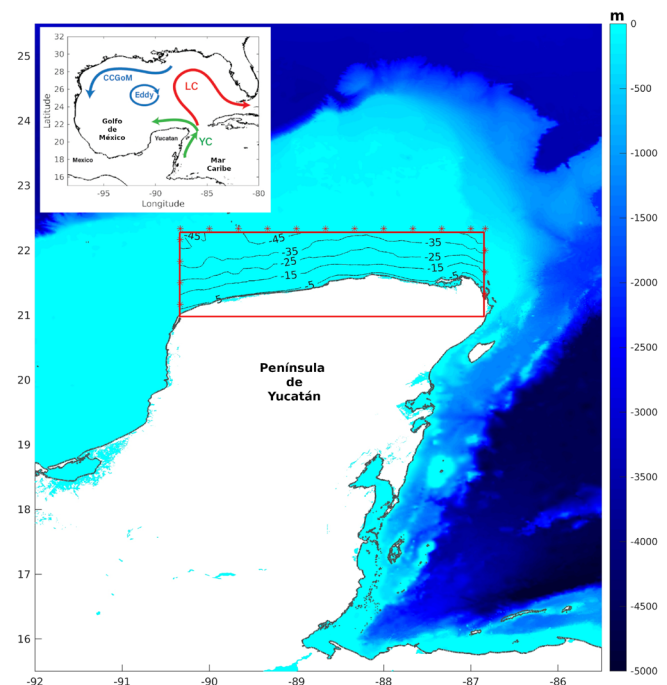


Figura 1. Área de estudio. Los colores indican la batimetría y el rectángulo rojo la costa norte de la Península de Yucatán. Las líneas dentro del dominio del modelo muestran la batimetría de alta resolución. Las cruces rojas representan los nodos donde los datos del modelo WWIII fueron empleados a lo largo de las fronteras del modelo Delft3D. El mapa del lado izquierdo muestra un diagrama de las principales corrientes y de la circulación general dentro del golfo de México (GoM), la Corriente de Yucatán (YC), la Corriente de Lazo (LC) y la Contra Corriente del GoM (CCGoM).

Considerando el año 2018 como un año de condiciones promedio en la zona, se realizó la simulación numérica de la hidrodinámica para la costa norte de la Península de Yucatán (PY) y utilizando una nueva metodología basada en redes neuronales no supervisadas, a partir de un análisis multivariado, se identificaron los diferentes patrones del campo dinámico que varían en tiempo y espacio. Esta técnica se le conoce como Mapas Auto-Organizados (SOMs por sus siglas en inglés) (Liu *et al.*, 2006).

Resultados

Analizando los patrones espaciales de la costa norte de la PY se observa una corriente predominantemente de este a oeste (Figura 2), con velocidades máximas al este de la PY, asociadas a la Corriente de Yucatán (Manta *et al.*, 2023). De acuerdo a la variabilidad espacial de la dinámica sobre la plataforma la Figura 2a muestra los 6 Patrones (P) encontrados con los SOMs. El patrón con mayor ocurrencia fue el P2 con 22.63 %, seguido del P1 (18.14 %), P5 (16.16 %), P3 (16.13 %), P6 (15.17 %) y P4 (11.77 %). Cada uno de éstos se presenta en diferentes épocas del año y su ocurrencia está estrechamente asociada con la dinámica atmosférica. Por ejemplo, se encontró que el P5 tuvo mayor ocurrencia entre septiembre y marzo. Lo anterior se observa mejor en la Figura 2b dónde el P5 aumenta desde agosto hasta alcanzar su máximo de ocurrencia en septiembre-octubre. En el caso del P4, muestra un mínimo de ocurrencia entre marzo y julio y máximos en enero y octubre. Tanto el P4 como el P5 tienen una variabilidad similar a lo largo del año, lo que sugiere que ambos patrones están asociados a la llegada de los frentes fríos (nortes) y a los eventos de tormenta (indicado por los vectores de corriente con origen del NE) que llegan a la región. Por otra parte, entre los meses de abril y agosto, la dinámica sobre la plataforma, de manera general, se puede decir que está dominada por las brisas terrestres y marinas, además

de observarse la influencia de la Corriente de Yucatán y los vientos del este (P1, P3 y P6). En particular el P2, con una mayor ocurrencia entre los meses de abril y julio, representa de forma evidente la intensificación de las brisas marinas. Lo anterior se puede observar en la Figura 2c, en donde se muestra el porcentaje de ocurrencia horario y se observa que la ocurrencia del P2 aumenta de las 11:00 UTC (05:00 hora local) hasta alcanzar su máximo a las 18:00 UTC (10:00 hora local), mientras que el P6 lo alcanza entre las 14:00-15:00 UTC (08:00-09:00 hora local). Esto coincide con un caso típico de brisas marinas (P2) y terrestres (P6) reportado por Allende-Arandía *et al.* (2022). Finalmente, el P1 muestra condiciones de transición entre las brisas (Figura 2a y 2c).

En cuanto a su variabilidad temporal, se identificaron un total de 9 Patrones (P). En este caso el análisis de los SOMs nos indica el porcentaje de cobertura que cada patrón tiene en la zona de estudio (Figura 3a) y la variabilidad temporal de cada área (Figuras 3b y 3c). Los resultados muestran que 7 patrones están asociados a la Corriente de Yucatán, P1-P4, P6 y P8-P9 (Figura 3a), sin embargo, los de mayor porcentaje de cobertura abarcan el 85.98 % del dominio (P5 y P7). Respecto a estos últimos dos patrones, se observa que su distribución espacial está delimitada por la batimetría de la zona, donde las corrientes más intensas se localizan a una profundidad >25 m (P5) y la corriente costera se ubica entre los 0 y 25 m de profundidad con velocidades máximas de 0.2 ms^{-1} y mayor variabilidad temporal (P7). También se puede observar en las series temporales, que las velocidades más intensas ocurrieron durante los meses de invierno y las más débiles durante los meses de verano (Figura 3b y 3c), lo que coincide y se asocia a la llegada de los frentes fríos y a los eventos de tormenta en la región. Estos máximos en la magnitud de la velocidad ($\sim 4 \text{ ms}^{-1}$), se encuentran dentro del rango de velocidades reportadas en estudios previos como el de Torres-Freyermuth *et al.* (2017).

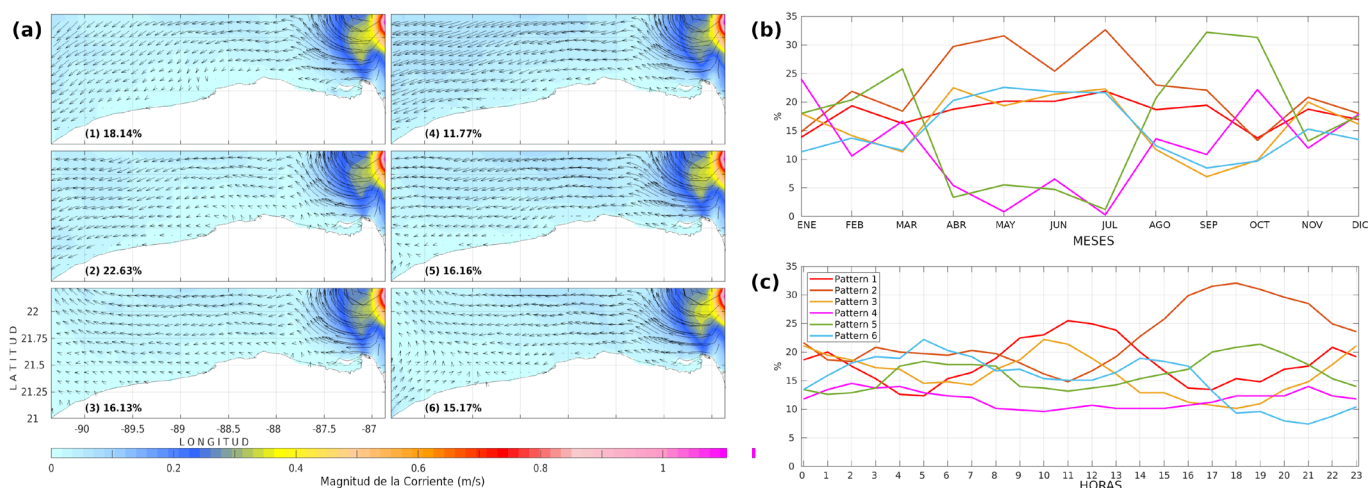


Figura 2. Patrones de ocurrencia obtenidos de los SOMs para la costa norte de la PY. (a) Los mapas muestran los patrones espaciales locales identificados por los SOMs. Cada mapa representa un patrón (como lo indica el número entre paréntesis), junto con su correspondiente porcentaje de ocurrencia espacial. Los colores representan la magnitud de la corriente (ms^{-1}) y las flechas indican la dirección de la corriente. (b) Acumulado diario y (c) horario de los porcentajes de ocurrencia de cada patrón obtenido para el 2018

Conclusiones

Este trabajo analiza a detalle la variabilidad espacio-temporal de las corrientes sobre la plataforma continental a lo largo de la costa norte de la Península de Yucatán a una escala regional. Los resultados muestran que esta región se pueden dividir en tres zonas de acuerdo a la dinámica observada: (1) al este, donde las corrientes están dominadas por la influencia de la Corriente de Yucatán y en menor medida por la Corriente del Lazo, caracterizada por tener una dirección dominante hacia el oeste; (2) la zona intermedia, la cual se puede considerar como una zona de transición, con una fuerte influencia de la dinámica proveniente del este pero también determinada por el forzamiento de los fenómenos atmosféricos (brisas de mar-tierra y vientos del norte); y la zona (3) al oeste, frente a la costa de Campeche, influenciada principalmente por los fenómenos atmosféricos (brisas de mar-tierra y vientos del norte). Estos resultados están respaldados por las tendencias generales reportadas por estudios previos a mayor escala para la plataforma continental. La importancia de la caracterización inicial de las tendencias y de los patrones de las corrientes costeras, sirve como base para futuros estudios utilizando periodos de tiempo extendidos y para estudiar los efectos del cambio climático.

Agradecimientos

Agradecemos a la UNAM-DGAPA PAPIIT (IA101121), Cátedras CONAHCyT (1146) (ahora Investigadoras e Investigadores por México, SECIHTI) y al Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (299063). Agradecemos el apoyo técnico de Ana Ramírez Manguilar, Gonzalo Uriel Martín Ruiz, José López González y Juan A. Gómez Liera.

Referencias

- Allende-Arandía, M. E., Zavala-Hidalgo, *et. al* (2022), Large diurnal wind variability over the western and northern Campeche Bank caused by the low latitude of the Yucatan Peninsula and its interaction with Easterlies. *Atmos. Res.*, 265, 105888.
- Azuz-Adeath, I., Rivera-Arriaga, E., *et. al* (2019). Current demographic conditions and future scenarios in Mexico's coastal zone. *JICZM/RGCI*. 19(2), 85-122.
- Bleck, R. (2002), An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4(1), 55-88.
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I.J., *et. al* (2010), Dispersion in the Yucatan coastal zone: implications for red tide events. *Cont. Shelf Res.* 30 (2), 127-137.
- Franklin, G. L., Allende-Arandía, M. E., Paladio-Hernández, A., & Kurczyn, J. A. (2025). Spatio-temporal variability of coastal currents along the Yucatan Peninsula using Self-Organising Maps. *Regional Studies in Marine Science*, 83, 104098.
- Halliwel Jr., G.R. (1998), Simulation of North Atlantic decadal/multidecadal winter SST anomalies driven by basin-scale atmospheric circulation anomalies. *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 5-21.
- Kurczyn, J.A., Beier, E., *et. al* (2024), Thermohaline and current variability off the west Yucatan Peninsula coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. V., *et. al* (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8-9), 883-915.
- Liu, Y., Weisberg, R. H., *et. al* (2006), Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction. *JGR*, 111(5), C05018.
- Manta, G., Durante, G., *et. al* (2023). Predicting the Loop Current dynamics combining altimetry and deep flow measurements through the Yucatan Channel. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1156159.
- Ruiz-Castillo, E., Gomez-Valdes, J., *et. al* (2016). Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf. *Cont. Shelf Res.* 118, 63-76.
- Torres-Freyermuth, A., Puleo, *et. al* (2017), Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Cont. Shelf Res.* 151.

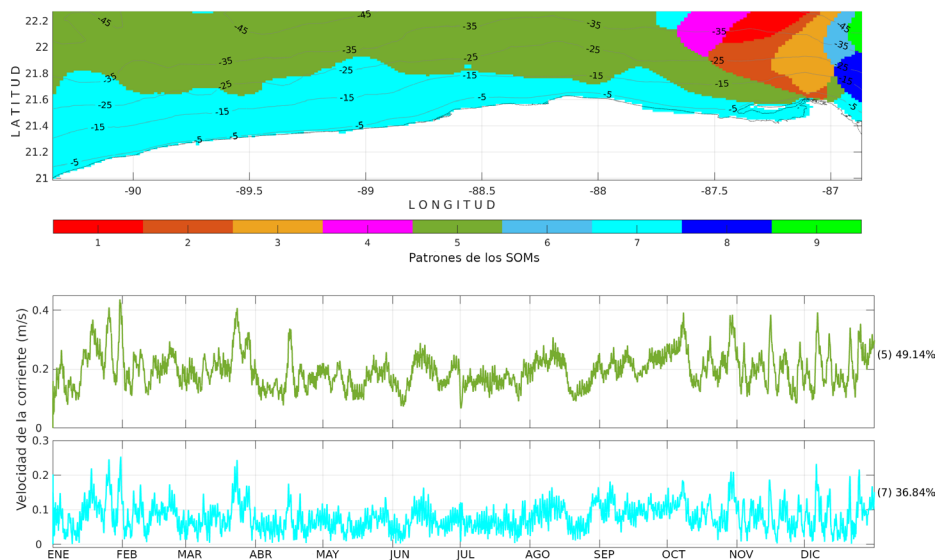


Figura 3. Patrones de cobertura obtenidos de los SOMs para la costa norte de la PY. (a) El mapa muestra los patrones temporales identificados por los SOMs. Las curvas de nivel indican la batimetría. Los colores indican el área que ocupa cada patrón en la zona de estudio. (b) y (c) son las series de tiempo (líneas verde y cian) que representan la variabilidad temporal que cada patrón (área del mismo color) tiene. El porcentaje de cobertura está indicado con el número entre paréntesis para cada serie de tiempo