

Retention time and transport potential of eddies in the northwestern Gulf of Mexico

Tiempo de retención y capacidad de transporte de los remolinos del noroeste del golfo de México

Fernando José Bello-Fuentes^{1*}, Héctor García-Nava², Fernando Andrade-Canto²,
Reginaldo Durazo¹, Rubén Castro¹, Ismael Yarbuh¹

¹ Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Ensenada-Tijuana
No. 3917, zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, Mexico.

² Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Ensenada-Tijuana, No. 3917, zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, Mexico.

* Corresponding author. E-mail: fbello@uabc.edu.mx

ABSTRACT. Eddies are transient structures that strongly influence mean ocean circulation. They modify the distribution of mass and properties such as heat, salt, chlorophyll, and passive particles. The capacity of eddies to transport properties or particles depends on their retention capacity. In this study the mesoscale eddies of the northwestern Gulf of Mexico (NWGM) were identified and characterized through a Lagrangian method that allows estimating the retention time and the mass fraction that they can retain and transport. For the analysis, daily 1993–2016 altimetry data were used. A total of 254 eddies, 73 anticyclones, and 181 cyclones, were detected in the study period. Approximately 30% of total detected eddies were identified to occur in a region at 94.75° W and 26.75° N, between the 1,000- and 2,500-m isobaths. On average, eddy radius was ~40 km for isobath <1,000 m and ~70 km for isobath >2,500 m. Mesoscale eddies in the NWGM can transport ~60% of the mass they had when they were detected. On average, mass transport occurs over 33 d for cyclones and 26 d for anticyclones. It rarely occurs for 60 d or more.

Key words: eddies, Lagrangian method, water mass retention, oil spill, transport.

RESUMEN. Los remolinos son estructuras transitorias que influyen en gran medida en la circulación promedio del océano. Modifican la distribución de masa y propiedades como calor, sal, clorofila y partículas inertes. La capacidad que tienen los remolinos para transportar propiedades o partículas depende de su capacidad de retención. En este estudio se identificaron y caracterizaron los remolinos de mesoescala del noroeste del golfo de México (NOGM) a través de un método lagrangiano que permite evaluar el tiempo de retención y la fracción de masa que pueden retener y transportar. Para el análisis, se utilizaron datos diarios de altimetría de 1993 a 2016. En el periodo de estudio se detectaron un total de 254 remolinos, 73 anticiclones y 181 ciclones. Se identificó una región (94.75° W, 26.75° N) donde ocurren ~30% del total de los remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1,000 y 2,500 m. En promedio, el radio de los remolinos fue de ~40 km para la isobata <1,000 m y ~70 km para la isobata >2,500 m. Los remolinos de mesoescala del NOGM pueden transportar ~60% de la masa que contenían al momento de ser detectados. En promedio, el transporte de masa ocurrió por 33 d para los ciclones y por 26 d para los anticiclones. Rara vez ocurrió por 60 d o más.

Palabras clave: remolinos, método lagrangiano, retención de masa de agua, derrame de hidrocarburos, transporte.

INTRODUCTION

Eddies are very common structures in the ocean that have a significant impact on the transport of mass and properties such as heat and salt. For instance, eddies that detach from the Loop Current (LC) transport Caribbean water across the Gulf of Mexico (GM) (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005, Tenreiro et al. 2018). In addition to increasing productivity through upwelling mechanisms (Hamilton and Lee 2005), eddies have been shown to modulate chlorophyll distribution through horizontal advection (Chelton et al. 2011a). Eddies can also affect the distribution and transport of plankton and fish larvae (Lobel and Robinson 1988, Sánchez-Velasco et al. 2013, Condie and Condie 2016).

INTRODUCCIÓN

Los remolinos son estructuras muy comunes en el océano que tienen un impacto importante en el transporte de masa y propiedades como el calor y la sal. Por ejemplo, los remolinos que se liberan de la corriente del Lazo (CL) transportan agua del Caribe a través del golfo de México (GM) (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005, Tenreiro et al. 2018). Se ha demostrado que los remolinos pueden modular la distribución de clorofila mediante advección horizontal (Chelton et al. 2011a), además de aumentar la productividad mediante mecanismos de surgencia (Hamilton y Lee 2005). Los remolinos también pueden afectar la distribución y el transporte del plancton y de larvas de peces (Lobel y Robinson 1988, Sánchez-Velasco et al. 2013, Condie y Condie 2016).

The general circulation in the GM is anticyclonic and its dynamics is influenced by the LC (Elliott 1982, Vidal et al. 1994, Zavala-Hidalgo et al. 2014, Meunier et al. 2018). The LC is an intense current that enters the GM through the Strait of Yucatán, extends into the north of the GM, and veers east to exit through the Straits of Florida (Andrade-Canto et al. 2013). It gets its name from the loop shape it takes inside the GM. The LC sheds large anticyclonic eddies measuring up to 300 km (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005) at irregular intervals, ranging from 15 d to 18 months (Andrade-Canto et al. 2013). Usually, eddies that detach from the LC influence circulation, hydrographic properties, and water masses in the GM. These eddies moved west until impacting against the slope of the western shelf of the GM, where they exchange momentum with their surroundings and generate coastal currents (Biggs et al. 1996, Ohlmann and Niiler 2005), as well as generating eddies upon their interaction with the coast (Vidal et al. 1994) and other eddies (Hamilton et al. 1999) in the region.

The northwestern GM (NWGM) (Fig. 1) is a highly dynamic region with a large number of eddies (Merrell and Morrison 1981; Vidal et al. 1992, 1994; Hamilton 2007). Circulation there is dominated by cyclonic and anticyclonic eddies of widely variable sizes, periods, and durations. Usually, several eddies occur simultaneously (Hamilton 2007). Furthermore, this region contains eddies that are generated independently of the eddies that are shed from the LC (Hamilton 2007).

NWGM eddies have been studied using hydrography (Hamilton 1992, Hamilton et al. 2002), drifters (Ohlmann et al. 2001), anchored buoys (Hamilton and Lee 2005), satellite altimetry-derived sea level anomalies (Leben 2005), and even combinations of different methods (Hamilton 2007). Different studies have defined the morphological characteristics of these eddies; however, these studies have assumed that the water mass contained within them is always the same (Chelton et al. 2011b). Beron-Vera et al. (2008) showed that eddy boundaries, obtained through Eulerian methods as sea surface height (SSH) contours or Okubo–Weiss parameters (Okubo 1970, Weiss 1991), generally deform within a few days and, therefore, part of the mass enclosed by these boundaries disperses throughout the surrounding medium. In addition, several studies have shown that eddies have limited capacity to transport mass because they exchange water with their surroundings in their paths (e.g., Biggs et al. 1996, Lipphardt et al. 2008, Wang et al. 2016). In particular, Lipphardt et al. (2008) showed that a large portion of the original core of the Millennium eddy (which occurred during the year 2001) dispersed over the western GM and that this core contained water from the western gulf and not just water from the Caribbean. Therefore, in order to analyze the transport capacity of eddies, it is advisable to study them from a Lagrangian point of view so that processes that are difficult to detect with SSH streamlines or contours can be distinguished (Lipphardt et al. 2008; Beron-Vera et al. 2008, 2013).

Few studies have quantified how long are eddies capable of transporting mass and preserving their properties (d'Ovidio

La circulación general en el GM es anticiclónica y su dinámica está influenciada por la CL (Elliott 1982, Vidal et al. 1994, Zavala-Hidalgo et al. 2014, Meunier et al. 2018). La CL es una corriente intensa que entra al GM por el estrecho de Yucatán, se extiende hacia el norte del GM y da un giro al este para salir por el estrecho de Florida (Andrade-Canto et al. 2013). Recibe su nombre por la forma de lazo que presenta dentro del GM. De la CL se desprenden grandes remolinos anticiclónicos con diámetros de hasta 300 km (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005), en intervalos irregulares que van de los 15 d a los 18 meses (Andrade-Canto et al. 2013). Comúnmente, los remolinos que se liberan de la CL influyen la circulación, las propiedades hidrográficas y las masas de agua del GM. Se desplazan hacia el oeste hasta impactar contra el talud de la plataforma oeste del GM, donde pueden intercambiar momento con su entorno y generar corrientes costeras (Biggs et al. 1996, Ohlmann y Niiler 2005), además de generar remolinos a través de su interacción con la costa (Vidal et al. 1994) y con otros remolinos (Hamilton et al. 1999) presentes en la región.

El noroeste del GM (NOGM) (Fig. 1) es una región altamente dinámica con una gran cantidad de remolinos (Merrell y Morrison 1981; Vidal et al. 1992, 1994; Hamilton 2007). La circulación está dominada por remolinos ciclónicos y anticiclónicos de tamaños, periodos y tiempos de duración ampliamente variables. Comúnmente se presentan varios remolinos de forma simultánea (Hamilton 2007). Además, se sabe que en esta región existen remolinos cuya generación es independiente de los remolinos que se liberan de la CL (Hamilton 2007).

Los remolinos del NOGM han sido estudiados mediante hidrografía (Hamilton 1992, Hamilton et al. 2002), derivadores (Ohlmann et al. 2001), boyas ancladas (Hamilton y Lee 2005), altimetría satelital de las anomalías del nivel del mar (Leben 2005) e incluso mediante la combinación de diferentes métodos (Hamilton 2007). En los diferentes estudios se han definido las características morfológicas de los remolinos; sin embargo, esto se ha hecho bajo el supuesto de que la masa de agua contenida dentro de ellos es siempre la misma (Chelton et al. 2011b). Beron-Vera et al. (2008) demostraron que la frontera de los remolinos, obtenida mediante métodos eulerianos como contornos de altura del nivel del mar (SSH, por sus siglas en inglés) u Okubo-Weiss (Okubo 1970, Weiss 1991), por lo general, se deforma en pocos días y, por tanto, parte de la masa que encierra dicha frontera se dispersa en el medio circundante. Adicionalmente, diversos estudios han demostrado que la capacidad de transporte de masa de los remolinos es limitada, pues durante su recorrido, intercambian agua con su entorno (e.g., Biggs et al. 1996, Lipphardt et al. 2008, Wang et al. 2016). Particularmente, Lipphardt et al. (2008) demostraron que gran parte del núcleo original del remolino Millennium (ocurrido durante el año 2001) se dispersó en el oeste del GM y que este núcleo contenía agua del golfo occidental y no solamente agua del Caribe. Por lo tanto, para analizar la capacidad de transporte de los remolinos, es recomendable estudiarlos desde un punto de vista

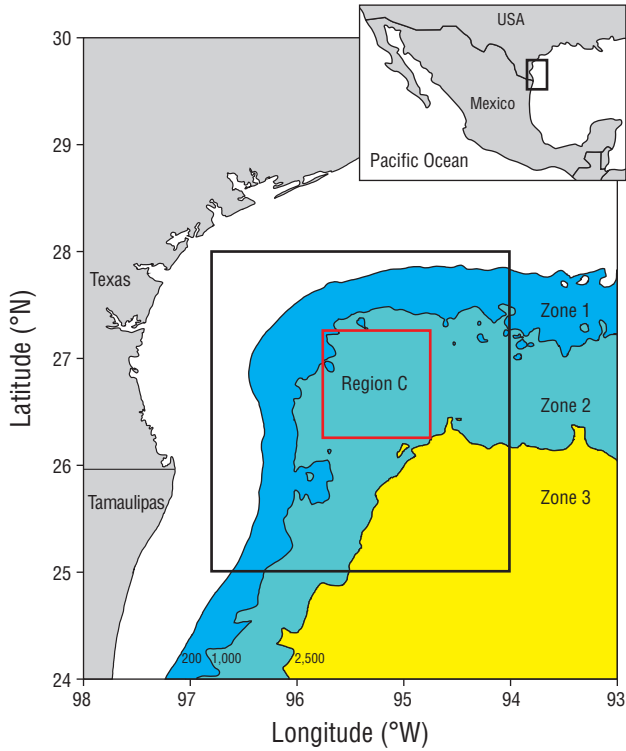


Figure 1. Map of the Gulf of Mexico showing the location of the study area (black square). The black curves represent bathymetry and the red square delimits region C. The zones are represented by the solid colors (see main text for details).

Figura 1. Mapa del golfo de México con la localización del área de estudio (recuadro negro). Las curvas negras representan la batimetría y el cuadro rojo delimita la región C. Las zonas están representadas por los colores sólidos (ver el texto principal para más detalles).

et al. 2013, Condie and Condie 2016, Cetina-Heredia et al. 2019). This topic is of particular interest in the NWGM, given that ocean dynamics in the region are influenced by a large number of eddies (Andrade-Canto et al. 2013, Meunier et al. 2018). In addition, the oil industry carries out intensive work in this region and is expected to expand to deeper waters. An oil spill can cost millions of dollars in losses and environmental damage, as in the case of the Deepwater Horizon oil spill (e.g., Smith et al. 2011). In the event of an oil spill in the NWGM, it is important to assess the effect that eddies could have on the retention and dispersion of oil in this region. This information can be used to make predictions in terms of retention times.

This study identifies eddies present in the NWGM between January 1993 and December 2016. It determines eddy boundaries, their morphological characteristics, how long were they able to transport a body of water within them (coherence time), and the percentage of mass they retained during that time. The method proposed by Haller et al. (2016), which defines eddies as rotationally coherent Lagrangian vortices, is used for this purpose.

lagrangiano que permita distinguir procesos que son difíciles de apreciar a partir de líneas de corriente o de contornos de SSH (Lipphardt et al. 2008; Beron-Vera et al. 2008, 2013).

Pocos estudios han cuantificado por cuánto tiempo los remolinos son capaces de transportar masa y conservar sus propiedades (d’Ovidio et al. 2013, Condie y Condie 2016, Cetina-Heredia et al. 2019). Este tema es de particular interés en el NOGM, dado que la dinámica oceánica de la región está influenciada por una gran cantidad de remolinos (Andrade-Canto et al. 2013, Meunier et al. 2018). Además, en dicha región se desarrolla una intensa labor petrolera, la cual se pretende extender hacia aguas más profundas. Un derrame de hidrocarburos puede costar millones de dólares en pérdidas y en daños ambientales, como en el caso del derrame del Deepwater Horizon (e.g., Smith et al. 2011). En caso de un derrame de hidrocarburos en el NOGM, es importante evaluar el efecto que podrían tener los remolinos en la retención y dispersión de hidrocarburos en esta región. Esta información puede utilizarse para realizar predicciones en términos de tiempos de retención.

En este trabajo, se identifican los remolinos presentes en el NOGM entre enero de 1993 y diciembre de 2016. Se determina la frontera de los remolinos, sus características morfológicas, el tiempo que estos pudieron transportar una masa de agua en su interior (tiempo de coherencia) y el porcentaje de masa que retuvieron durante dicho tiempo. Para ello, se utiliza el método propuesto por Haller et al. (2016), en el que se definen los remolinos como vórtices lagrangianos rotacionalmente coherentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La detección de remolinos se realiza a partir del campo de corrientes superficiales geostroficadas $\vec{v} = (u, v)$ calculadas a partir de la topografía dinámica absoluta η como

$$u = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad v = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (1)$$

donde g es la aceleración gravitatoria, $f = 2\Omega \sin \lambda$ es el parámetro de Coriolis, Ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra, $\vec{x} = (x, y)$ es el vector posición y λ es la latitud.

Para este estudio, se utilizaron los campos de SSH obtenidos de la base de datos de Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Los datos utilizados cubren el periodo de enero de 1993 a diciembre de 2016 y tienen una resolución espacial de $1/4^\circ$ y resolución temporal de un día. Los datos se encuentran disponibles en la base de datos de Copernicus Marine Services en la siguiente dirección web: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (fecha de acceso: agosto de 2020).

El método para la detección de remolinos utilizado en este trabajo se basa en el cálculo del campo de la desviación de la vorticidad lagrangiana promedio (LAVD, por sus siglas en

MATERIALS AND METHODS

Data and coherent eddy detection

Eddy detection is done from the field of surface geostrophic currents $\tilde{v} = (u, v)$ calculated using the absolute dynamic topography η as

$$u = \frac{g}{f} \frac{\delta\eta}{\delta y} , \quad v = -\frac{g}{f} \frac{\delta\eta}{\delta x} ; \quad (1)$$

where g is the gravitational acceleration, $f = 2\Omega \sin \lambda$ is the Coriolis parameter, Ω is the rotational angular velocity of the Earth, $\tilde{x} = (x, y)$ is the position vector, and λ is the latitude. For this study, the SSH fields obtained from the Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>) database were used. The data used cover the period from January 1993 to December 2016 and have a spatial resolution of $1/4^\circ$ and temporal resolution of one day. Data are available from the Copernicus Marine Services database on the following website: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA-LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (accessed August 2020).

The eddy detection method used in this study is based on the computation of the Lagrangian-averaged vorticity deviation (LAVD) field. The LAVD field is a dynamically consistent and objective measure of bulk material rotation relative to the spatial mean rotation of the fluid volume (Haller et al. 2016). This method objectively identifies material tubes along which small volumes of fluid experience the same net rotation within a time interval $[t_0, t_f]$ relative to the mean rigid-body rotation of the fluid (Haller et al. 2016). Eddy boundaries can therefore be clearly detected. These boundaries do not show filamentation and the interior of the eddy does not show advective mixing with its surroundings (Haller et al. 2016).

From the geostrophic velocity field, the trajectory of the fluid particles can be obtained by solving

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \tilde{v} , \quad (2)$$

which defines the flow map

$$F_{t_0}^t: \tilde{x}_0 \rightarrow \tilde{x}(t; x_0), t \in [t_0, t_f] , \quad (3)$$

which tracks the particles from their initial position x_0 at the initial time, t_0 , to a later position $\tilde{x}(t; x_0)$ at a later time (Haller et al. 2016).

The relative vorticity ω of the particles that belong to the flow map is calculated for each instant of time as follows:

$$\omega(\tilde{x}(t; x_0), t) = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} , \quad (4)$$

inglés). El campo de LAVD es una medida dinámicamente consistente y objetiva de la rotación de material neto, relativo al promedio espacial de la rotación del volumen del fluido (Haller et al. 2016). Este método permite identificar objetivamente tubos materiales a lo largo de los cuales pequeños volúmenes de fluido experimentan la misma rotación neta en un intervalo de tiempo $[t_0, t_f]$ relativo a la rotación de cuerpo rígido promedio del fluido (Haller et al. 2016). Por tanto, es posible detectar el límite de un remolino de manera clara. Estos límites no presentan filamentación y el interior del remolino no tiene mezcla advectiva con sus alrededores (Haller et al. 2016).

Del campo de velocidades geostóricas se puede obtener la trayectoria de las partículas de fluido resolviendo

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \tilde{v} , \quad (2)$$

con lo que se define el mapa de flujo

$$F_{t_0}^t: \tilde{x}_0 \rightarrow \tilde{x}(t; x_0), t \in [t_0, t_f] , \quad (3)$$

que da seguimiento a las partículas desde su posición inicial x_0 al tiempo inicial, t_0 , hasta una posición posterior $\tilde{x}(t; x_0)$ al tiempo (Haller et al. 2016).

La vorticidad relativa ω de las partículas que pertenecen al mapa de flujo se calcula para cada instante de tiempo como sigue:

$$\omega(\tilde{x}(t; x_0), t) = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} , \quad (4)$$

y el campo de LAVD se define matemáticamente como sigue:

$$LAV D_{t_0}^t(x_0) = \int_{t_0}^t |\omega(\tilde{x}(s; x_0), s) - \bar{\omega}(s)| ds; \quad s, t \in [t_0, t_f] , \quad (5)$$

donde $\bar{\omega}$ es la vorticidad instantánea promedio de las partículas (Haller et al. 2016).

Con base en la definición de LAVD, un remolino contiene una familia anidada de superficies de nivel de LAVD, con valores máximos en el centro (Haller et al. 2016). El anillo más externo de esa familia de curvas anidadas (anillo límite) define la frontera del conjunto de partículas que se mantienen unidas. Todas rotan con la misma tasa de rotación media como si fuesen la superficie de un cuerpo rígido durante el tiempo de integración para el que fue calculado el campo de LAVD.

La advección de partículas se realizó a partir de una malla inicial con resolución de $1/32^\circ$. La trayectoria de las partículas se determina utilizando el método Runge-Kutta de cuarto/quinto orden con un paso de tiempo adaptativo y un método de interpolación tricúbico. Los campos de LAVD se calculan a partir de la vorticidad de las partículas advectadas (ecuación 5).

and the LAVD field is mathematically defined as follows:

$$LAV D'_i(x_0) = \int_{t_0}^t |\omega(\tilde{x}(s; x_0), s) - \bar{\omega}(s)| ds; \quad (5)$$

$$s, t \in [t_0, t_f] ,$$

where $\bar{\omega}$ is the average instantaneous vorticity of the particles (Haller et al. 2016).

Considering the definition of LAVD, an eddy contains a nested family of LAVD level surfaces, with maximum values at the center (Haller et al. 2016). The outermost ring of this family of nested curves (limit ring) defines the boundary of the set of particles that remain conjoined. They all rotate at the same mean rotation rate as if they were the surface of a rigid body during the integration time for which the LAVD field was calculated.

Particle advection was carried out using an initial mesh with a resolution of $1/32^\circ$. The trajectory of the particles is determined using the fourth/fifth order Runge–Kutta method with an adaptive time step and a tricubic interpolation method. The LAVD fields are calculated using the vorticity of the advected particles (equation 5).

The eddy identification process was carried out every 15 d from 01 January 1993 to 01 December 2016. For each identification process, LAVD fields were calculated using forward-in-time integrations from an initial time t_0 to a final integration time $t = t_0 + \tau$, where τ ranges from 15 d to 120 d in daily intervals. Maximum integration time ($\tau = 120$ d) was set by preliminary tests that indicated that NWGM eddies rarely maintain their coherence for over 120 d.

Eddies were identified following the recommendations of Haller et al. (2016) and Abernathy and Haller (2018). The main steps and criteria used are listed below:

- I. The maxima of each LAVD field were detected.
- II. From each LAVD field, the outermost closed contour that satisfied the 0.01 convexity tolerance was extracted.
- III. Limit rings with radii smaller than 22 km were discarded.
- IV. Each ring was advected from time t_0 to τ . Rings with $L_t/L_0 < 1.1$ were considered to be coherent at time τ , where L_0 and L_t are the perimeter of the ring at the beginning and end of advection, respectively.

To ensure that eddies were counted only once during their coherence period, in each identification process the centroids of the newly detected eddies were verified to fall outside the boundary ring of the eddies detected in the previous process.

The boundary of an eddy is the limit ring obtained from the LAVD field computed with $\tau = 15$ d. Henceforth, it is referred to as the boundary ring (R_b). From each LAVD field with $15 < \tau \leq 120$ d, the concentric boundary rings with radii decreasing toward the center were determined. The last ring that can be detected delimits the core of the eddy and is denominated coherence ring (R_c) (Fig. 2).

El proceso de identificación de los remolinos se realizó cada 15 d a partir del 01 de enero de 1993 hasta el 01 de diciembre de 2016. Para cada proceso de identificación, se realizó el cálculo de campos de LAVD integrando hacia adelante en el tiempo desde un tiempo inicial t_0 hasta un tiempo de integración final $t = t_0 + \tau$, donde τ va desde 15 d hasta 120 d en intervalos diarios. El tiempo máximo de integración ($\tau = 120$ d) se fijó por ensayos preliminares que indicaron que los remolinos del NOGM rara vez alcanzan 120 d de coherencia.

Los remolinos se identificaron siguiendo las recomendaciones de Haller et al. (2016) y de Abernathy y Haller (2018). A continuación, se enlistan los principales pasos y criterios utilizados:

- I. Se detectaron los máximos de cada campo de LAVD.
- II. De cada campo de LAVD, se extrajo el contorno cerrado más externo que satisfizo la tolerancia de convexidad 0.01.
- III. Se descartaron los anillos límite con radios menores que 22 km.
- IV. Cada anillo se advectó desde un tiempo t_0 hasta τ . Se consideraron como coherentes al tiempo τ los anillos con $L_t/L_0 < 1.1$, donde L_0 y L_t son el perímetro del anillo al inicio y al final de la advección, respectivamente.

Para asegurar que los remolinos se contabilizaran una sola ocasión durante su periodo de coherencia, en cada proceso de identificación se verificó que los centroides de los nuevos remolinos detectados estuviesen fuera del anillo frontera de los remolinos detectados en el proceso anterior.

La frontera del remolino es el anillo límite que se obtiene del campo de LAVD calculado con $\tau = 15$ d. De ahora en adelante se le denomina anillo frontera (A_f). De cada campo de LAVD con $15 < \tau \leq 120$ d, se determinaron anillos límite concéntricos con radios decrecientes hacia el centro. El último anillo que se puede detectar delimita al núcleo del remolino y se le denomina anillo de coherencia (A_c) (Fig. 2).

Características de los remolinos

La batimetría puede afectar el comportamiento y las características de los remolinos (Lipphardt et al. 2008). Por ello, para el análisis, el área de estudio se dividió en 3 zonas, una somera (zona 1) con profundidades inferiores a 1,000 m, una intermedia (zona 2) con profundidades entre 1,000 y 2,500 m, y una profunda (zona 3) con profundidades superiores a los 2,500 m (Fig. 1).

La posición inicial del remolino se define como el centroide de A_f . Las distancias desde el centroide hasta cada punto de la frontera definen un conjunto de radios que definen sus características. La trayectoria del remolino se obtiene de la posición del centroide del A_c para cada instante de tiempo. En este trabajo se consideraron solo los remolinos de mesoescala, por lo que el A_c debió ser mayor que ~ 22 km, el radio de deformación de Rossby baroclínico para el NOGM (Hamilton 2007).

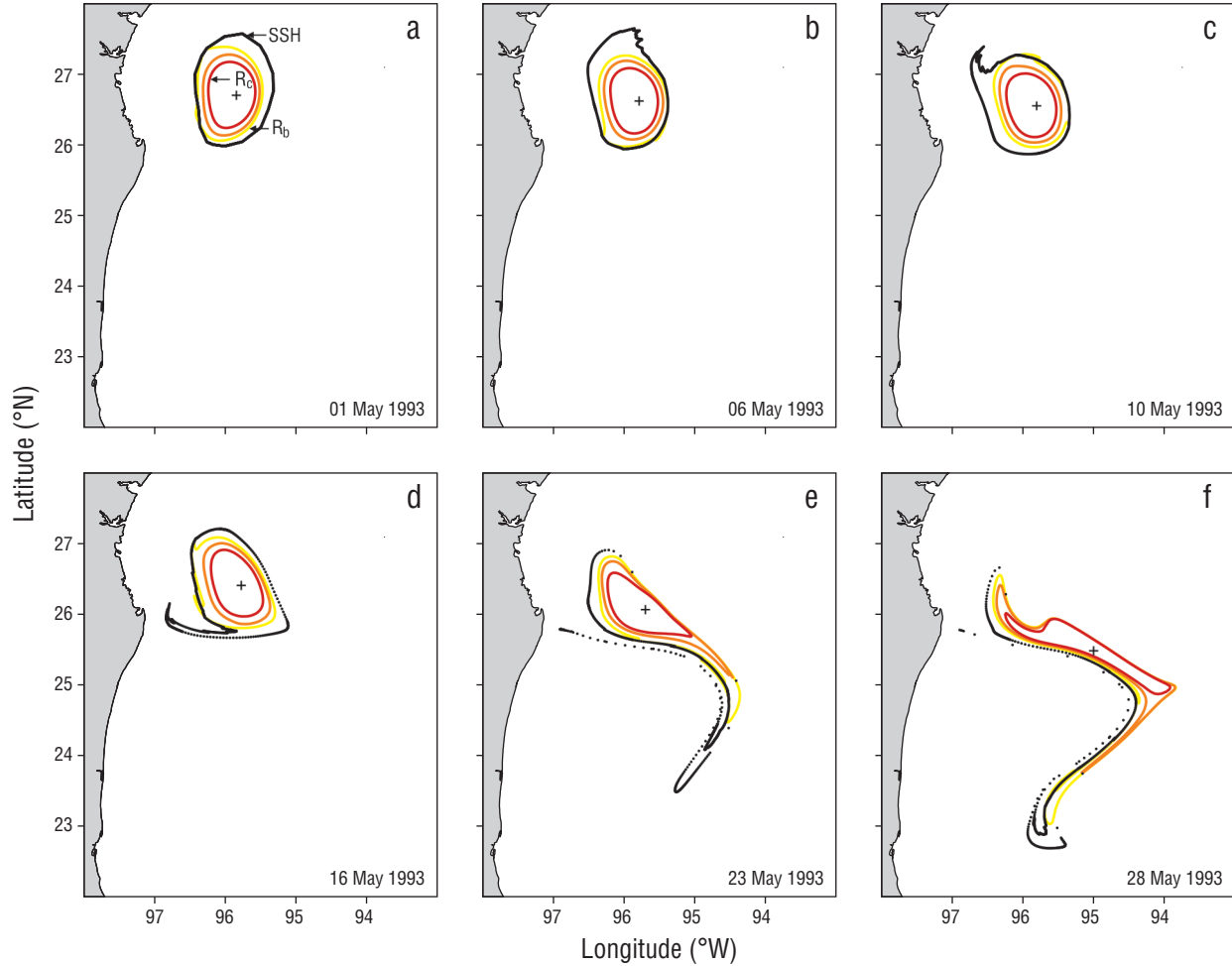


Figure 2. Example of cyclonic eddy detection. The sequence from (a) to (f) represents the advected sea surface height contour and limit rings computed from the Lagrangian-averaged vorticity deviation fields. The cross represents the centroid of the coherence ring (R_c). R_b , boundary ring; SSH, sea surface height.

Figura 2. Ejemplo de la detección de un remolino ciclónico. La secuencia de (a) a (f) representa el contorno de la altura de la superficie del mar advectada y los anillos frontera calculados con el campo de la desviación de la vorticidad lagrangiana promedio. La cruz representa el centroide del anillo de coherencia (R_c). R_b , anillo de frontera; SSH, altura del nivel del mar.

Eddy characteristics

Bathymetry can affect eddy behavior and characteristics (Lipphardt et al. 2008). For the analysis, the study area was therefore divided into 3 zones, a shallow zone (zone 1) with depths down to 1,000 m, an intermediate zone (zone 2) with depths between 1,000 and 2,500 m, and a deep zone (zone 3) with depths over 2,500 m (Fig. 1).

The initial position of the eddy is defined as the centroid of R_b . The distances from the centroid to each point along the boundary define a set of radii that define its characteristics. The trajectory of the eddy is obtained from the position of the centroid of R_c at each instance of time. Because only meso-scale eddies were considered in this study, R_c had to be larger than ~ 22 km, the baroclinic Rossby radius of deformation for NWGM (Hamilton 2007).

La velocidad angular, σ , se calcula como sigue:

$$\sigma = \frac{\text{sign}(\Theta) V}{\bar{R}}, \quad (6)$$

donde Θ es el desplazamiento angular, V la velocidad tangencial promedio de las partículas en la frontera del remolino y \bar{R} es el radio promedio. El periodo de rotación es $T = 2\pi/\sigma$ (Dong et al. 2011).

El tiempo de coherencia de cada remolino corresponde al tiempo τ al cual se obtuvo el A_c . Como ejemplo, en la Figura 2 se muestra la evolución temporal del contorno de SSH, el A_f ($\tau = 15$), un anillo límite para $\tau = 18$, y el A_c ($\tau = 22$) de un remolino del NOGM desde su detección hasta 5 d después de perder su coherencia (ver material suplementario: la animación en la versión en línea [Animación S1] o la secuencia de figuras en este documento [Fig. S1]). Este

The angular velocity, σ , is calculated as follows:

$$\sigma = \frac{\text{sign}(\Theta)V}{\bar{R}}, \quad (6)$$

where Θ is the angular displacement, V the mean tangential velocity of particles on the eddy boundary, and \bar{R} is the mean radius. The rotation period is $T = 2\pi/\sigma$ (Dong et al. 2011).

The coherence time for each eddy corresponds to the time τ at which R_c was obtained. As an example, Figure 2 shows the temporal evolution of the SSH contour, the R_b ($\tau = 15$), a limit ring for $\tau = 18$, and the R_c ($\tau = 22$) of a NWGM eddy from its detection to 5 d after losing its coherence (see supplementary material: the animation on the online version [Animation S1] or the sequence of figures in this document [Fig. S1]). This example shows that the SSH contour rapidly becomes filamented and that some of its particles disperse to the west, while the coherent part of the eddy detected with the LAVD method, delimited by R_c , remains coherent for 22 d. When R_c filamentation occurs (Fig. 2f), loss of eddy coherence becomes evident.

The percentage of the mass that is preserved at coherence time, L , is estimated as follows:

$$L = \left(\frac{A_{Rc}}{A_{Rb}} \right) \times 100, \quad (7)$$

where A_{Rc} is the area of the R_c and A_{Rb} is the area of the eddy boundary, which is the area of the eddy upon detection. Since rings are material curves, this variable expresses the percentage of the eddy's initial mass remaining within it throughout the coherence time.

RESULTS

Eddy identification in the northwestern Gulf of Mexico

In the analysis of the 23 years, a total of 254 eddies were identified in the NWGM, 181 of which were cyclonic and 73 anticyclonic (Table 1). There was a notorious predominance of cyclonic over anticyclonic eddies, with a ratio of 2.5:1.0. Cyclonic eddies were present 80.5% of the time in the study period, whereas anticyclonic eddies were present only 27.7% of the time (Table 1); that is, cyclonic eddies were present almost 3 times longer than anticyclonic eddies. The ratio of cyclonic to anticyclonic eddies was 3.3:1.0 in zone 1, 2.5:1.0 in zone 2, and 1.8:1.0 in zone 3. The density of eddies per 10,000 km² in zones 1, 2, and 3 was 9, 29, and 18 for cyclonic eddies and 3, 11, and 10 for anticyclonic eddies, respectively.

Approximately 31% of cyclonic eddies in zone 2 were detected in an area of 1° × 1°, marked as Region C in Figure 1. The occurrence of cyclonic eddies in this area is more than twice the occurrence that would be expected if eddies occurred homogeneously throughout the area. Anticyclonic eddies showed a more uniform spatial distribution

ejemplo muestra que el contorno de SSH se filameta rápidamente y que algunas partículas de este contorno se dispersan hacia el oeste, mientras que la parte coherente del remolino detectado con el método LAVD, delimitada por A_c , se mantiene coherente por 22 d. Cuando ocurre la filamentación de A_c (Fig. 2f), se hace evidente que el remolino ha perdido su coherencia.

El porcentaje de la masa que se conserva al tiempo de coherencia, L , se estima como sigue:

$$L = \left(\frac{A_{Ac}}{A_{Af}} \right) \times 100, \quad (7)$$

donde A_{Ac} es el área del A_c y A_{Af} es el área de la frontera del remolino, el área del remolino al ser detectado. Puesto que los anillos son curvas materiales, esta variable expresa el porcentaje de la masa inicial del remolino que se mantiene dentro de éste durante todo el tiempo de coherencia.

RESULTADOS

Identificación de remolinos en el noroeste del golfo de México

En el análisis de los 23 años se identificaron un total de 254 remolinos en el NOGM, de los cuales 181 fueron ciclónicos y 73 anticiclónicos (Tabla 1). Es notorio el predominio de los remolinos ciclónicos sobre los anticiclónicos en relación 2.5:1.0. Los remolinos ciclónicos estuvieron presentes el 80.5% del tiempo total del estudio, mientras que los anticiclónicos solamente estuvieron presentes el 27.7% del tiempo (Tabla 1); es decir, los remolinos ciclónicos estuvieron presentes casi 3 veces más tiempo que los remolinos anticiclónicos. La relación entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos fue de 3.3:1.0 en la zona 1, 2.5:1.0 en la zona 2 y 1.8:1.0 en la zona 3. La densidad de remolinos por cada 10,000 km² en las zonas 1, 2 y 3 fue de 9, 29 y 18 para los ciclónicos y de 3, 11 y 10 para los anticiclónicos, respectivamente.

Aproximadamente el 31% de los remolinos ciclónicos de la zona 2 se detectaron en un área de 1° × 1°, marcada como Región C en la Figura 1. En esta área ocurrieron más del doble de los remolinos ciclónicos que se esperarían si la ocurrencia de remolinos fuera homogénea en toda el área. Por su parte, los remolinos anticiclónicos presentaron una distribución espacial más uniforme que su contraparte ciclónica. Sin embargo, se observaron 3 sectores al rededor de la región C en los que ocurrieron un mayor número de anticiclones: uno al este, otro al oeste y el último al suroeste (Fig. 3).

Estadística descriptiva de remolinos

La frontera de los remolinos detectados con LAVD permite definir el radio como la distancia desde el centroide hasta el límite del conjunto de partículas que se mantienen rotando juntas dentro del remolino. En la zona 1, el 75% de

Table 1. Number and characteristics of eddies detected with a Lagrangian method in the northwestern Gulf of Mexico (NWGM) from 1993 to 2016.**Tabla 1.** Número y características de remolinos detectados con el método lagrangiano en el noroeste del golfo de México (NWGM, por sus siglas en inglés) de 1993 a 2016.

Type	Description	Zone 1	Zone 2	Zone 3	NWGM
Cyclones	Quantity	35	112	34	181
	Median radius (km)	40.48	53.18	55.53	51.52
	Quartile range (km)	24.17	24.93	48.72	48.72
	Persistence time	-	-	-	27.77%
Anticyclones	Quantity	10	44	19	73
	Median radius (km)	43.6	50.00	68.28	52.80
	Quartile range (km)	20.96	26.89	27.45	28.39
	Persistence time	-	-	-	80.49%
All	Quantity	45	156	53	264

than their cyclonic counterpart. However, 3 sectors were observed around region C where a greater number of anticyclones occurred: one to the east, another one to the west, and the last one to the southwest (Fig. 3).

Descriptive statistics of eddies

By detecting eddy boundaries with LAVD, we can define the radius as the distance from the centroid to the boundary of the set of particles that rotate conjointly within the eddy. In zone 1, 75% of the eddies had a radius smaller than 54 km. The median radius was ~40 km, although cyclonic eddies with radii up to ~90 km were detected. In zone 2, 75% of eddies had radii that were less than 65 km and the median radius was ~50 km. By contrast, anticyclonic (cyclonic) eddies in zone 3 were, on average, ~25 km (~15 km) larger than the anticyclones (cyclones) in zone 1 (P value < 0.1 for anticyclones and cyclones). Despite the differences between the median radii for cyclones and anticyclones in zone 3, no significant differences were detected between cyclones and anticyclones when all eddies in the zone were considered, given the variability in eddy radii. Figure 4 (a, b) shows that the radius for eddies in the shallow zone was smaller than that for eddies in the deep zone and it seems to indicate a linear trend. A linear correlation analysis between the radius and the bathymetry associated with eddy centroids showed that bathymetry could moderately influence eddy size ($\rho = 0.35$, P value < 0.1).

Eddy rotation periods were also different between the shallow zone and the deep zone (P value < 0.1), but with low linear relationship between them ($\rho = 0.25$, P value < 0.1) (Fig. 4c). Eddy rotation periods were greater in the shallow zone than in the deep zone. On average, the rotation periods for cyclonic and anticyclonic eddies in zone 3 were, respectively, 7 and 4 d shorter than those corresponding to eddies in zone 1.

los remolinos tuvieron radio menor que 54 km. La mediana del radio fue de ~40 km, aunque se detectaron remolinos ciclónicos que alcanzaron ~90 km de radio. En la zona 2, 75% de los remolinos tuvieron radio menor que 65 km y la mediana del radio fue de ~50 km. En contraste, los remolinos anticiclónicos (ciclónicos) de la zona 3 fueron, en promedio, ~25 km (~15 km) más grandes que los anticiclones (ciclones) de la zona 1 (valor de $P < 0.1$ para anticiclones y ciclones). Pese a la diferencia entre la mediana de los radios de los ciclones y de los anticiclones de la zona 3, no se detectó diferencia significativa entre ciclones y anticiclones al considerar todos los remolinos de la zona, debido a la variabilidad de los radios de los remolinos. En la Figura 4(a, b) se puede apreciar que el radio de los remolinos de la zona somera fue menor que el radio de los de la zona profunda y pareciera indicar una tendencia lineal. Un análisis de correlación lineal entre el radio y la batimetría asociada al centroide del remolino mostró que la batimetría podría tener una influencia moderada en el tamaño de estos ($\rho = 0.35$, valor de $P < 0.1$).

El periodo de rotación de los remolinos también mostró una diferencia entre la zona somera y la zona profunda (valor de $P < 0.1$), pero con relación lineal baja entre ambos ($\rho = 0.25$, valor de $P < 0.1$) (Fig. 4c). El periodo de rotación de los remolinos de la zona somera fue mayor que el periodo de rotación de los remolinos de la zona profunda. En promedio, los periodos de rotación de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos de la zona 3 fueron, respectivamente, 7 y 4 d menos que los correspondientes a los remolinos de la zona 1.

El tiempo de coherencia es el tiempo durante el cual el remolino conserva las partículas de su núcleo dentro de él. En el momento que un remolino pierde coherencia, deja de comportarse como un cuerpo rígido y se deforma. En consecuencia, libera o intercambia partículas con el medio que lo rodea. La mayoría de los remolinos detectados tienen tiempos de coherencia menores que 60 d (Fig. 5a). La mediana del

Coherence time is the time over which the eddy preserves its core particles within it. When an eddy loses coherence, it stops behaving like a rigid body and it deforms. Consequently, it releases or exchanges particles with the surrounding environment. Most of the eddies detected here have coherence times shorter than 60 d (Fig. 5a). The median coherence time for cyclones increased as the depth corresponding to the position of their centroids increased, from 25 d in zone 1 to approximately 44 d in zone 3 (Fig. 5a). However, the linear correlation between both variables for cyclonic eddies was low ($\rho = 0.29$, P value < 0.1). Conversely, the coherence time for anticyclones was similar in the 3 depth bands, with a median of around 30 d (Fig. 5a).

Eddy contours detected with Lagrangian methods, such as the one used in this study, represent material curves. If

tiempo de coherencia de los ciclones aumentó con la profundidad que corresponde a la posición de su centroide, desde 25 d en la zona 1 hasta aproximadamente 44 d en la zona 3 (Fig. 5a). Sin embargo, la correlación lineal entre ambas variables para los remolinos ciclónicos fue baja ($\rho = 0.29$, valor de $P < 0.1$). En contraste, el tiempo de coherencia de los anticiclones fue similar en las 3 bandas de profundidad, con una mediana de alrededor de los 30 d (Fig. 5a).

Los contornos de los remolinos detectados con métodos lagrangianos, como el utilizado en este trabajo, representan curvas materiales. Si suponemos que el fluido es incompresible, el área delimitada por el contorno del remolino es proporcional a la masa que contiene en su interior. Por lo que, al comparar el área inicial del remolino contra el área del A_c (i.e., la relación L), podemos tener una idea de la cantidad de

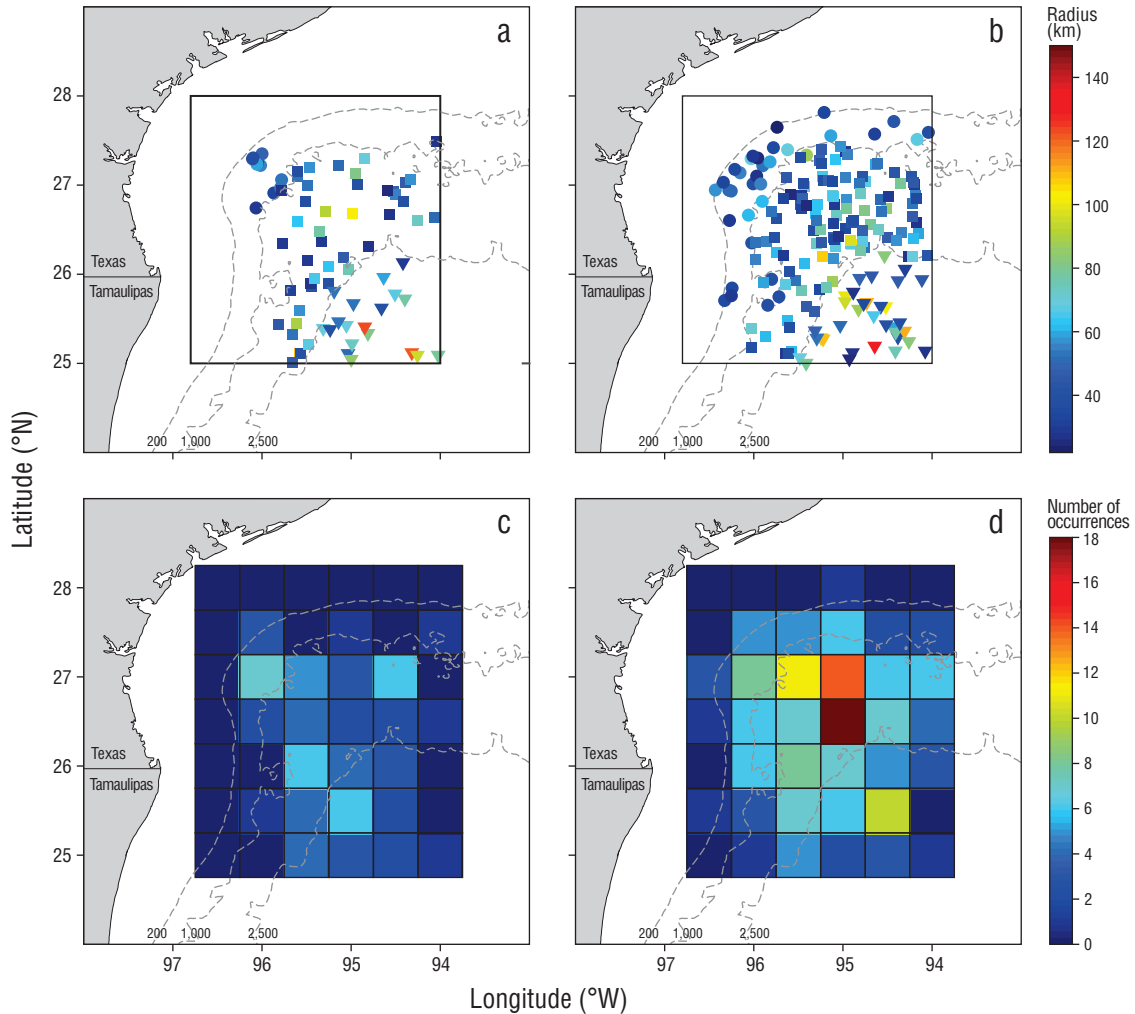


Figure 3. Centroids of anticyclones (a) and cyclones (b) for zones 1 (circles), 2 (squares), and 3 (triangles). In (a) and (b) the color bar indicates eddy radius. Also shown are the number of anticyclones (c) and cyclones (d) detected within $0.5 \times 0.5^\circ$ bins. In (c) and (d) the color bar represents the number of detected eddies per bin.

Figura 3. Centroides de anticiclones (a) y ciclones (b) para la zona 1 (círculos), 2 (cuadrados) y 3 (triángulos). En (a) y (b) la barra de colores indica el radio de los remolinos. También se muestra el número de anticiclones (c) y ciclones (d) detectados en conjuntos de $0.5 \times 0.5^\circ$. En (c) and (d) la barra de colores representa el número de remolinos detectados por conjunto.

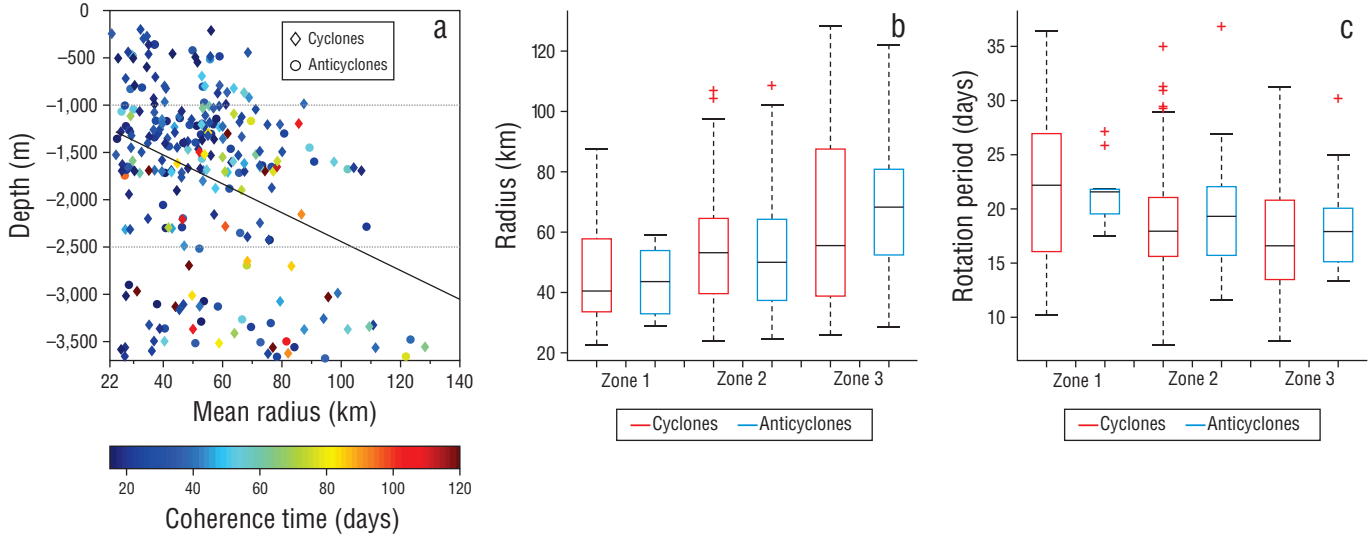


Figure 4. (a) Depth corresponding to the centroid of cyclones (diamonds) and anticyclones (circles) as function of radius. Gray dotted lines delimit the depths for each zone. The linear regression curve is presented in black. (b) Boxplot of radii of eddies in each detection zone. (c) Boxplot of the rotation period of eddies in each detection zone. The upper part of each box represents the 75th percentile and the bottom part the 25th percentile; the black line inside the box is the median, the red crosses identify outliers, and the lower and upper error bars are the minimum and maximum values, respectively.

Figura 4. (a) Profundidad correspondiente al centroide de los ciclones (diamantes) y anticiclones (círculos) como función del radio. Las líneas grises punteadas delimitan las profundidades de cada zona. La curva de la regresión lineal se muestra en negro. (b) Diagrama de cajas de los radios de los remolinos para cada zona de detección. (c) Diagrama de cajas del periodo de rotación de los remolinos en cada zona de detección. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la parte inferior el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas identifican valores atípicos y las barras inferiores y superiores son los valores mínimos y máximos, respectivamente.

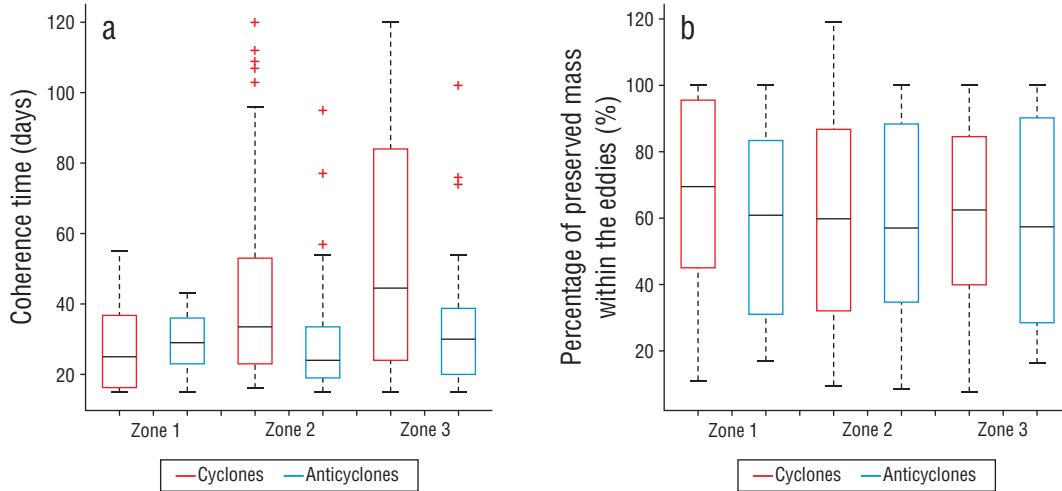


Figure 5. (a) Boxplot of coherence times of eddies in each zone. (b) Boxplot of the percentage of preserved mass for eddies in each zone. The upper part of each box represents the 75th and the bottom part the 25th percentile; the black line inside the box is the median, the red crosses identify outliers, and the lower and upper error bars are the minimum and maximum values, respectively.

Figura 5. (a) Diagrama de cajas de los tiempos de coherencia de los remolinos de cada zona. (b) Diagrama de caja de los porcentajes de las masas preservadas para los remolinos de cada zona. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la parte inferior el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas identifican valores atípicos y las barras inferiores y superiores son los valores mínimos y máximos, respectivamente.

we assume that the fluid is incompressible, the area delimited by the eddy contour is proportional to the mass it contains. Therefore, by comparing the initial area of the eddy with the area of R_c (i.e., the L ratio), we can have an idea of the amount of mass that the eddy is able to retain during its coherence period. On average, the eddies detected in the NWGM retained $\sim 60\%$ of their mass throughout their coherence period. In general, there were no differences between cyclonic and anticyclonic eddies except in zone 1, where cyclones had a slight tendency to preserve more mass than eddies in other zones (P value < 0.1). On the other hand, small eddies tended to dissipate as they lost coherence, whereas large eddies were able to regroup and form a new eddy that contained part of the mass of the previous eddy and surrounding water.

DISCUSSION

Eddies in the northwest Gulf of Mexico

Eulerian methods assume that mesoscale eddies, defined from SSH contours or streamlines (Fig. 2), trap and transport water masses for long periods of time, particularly when the rotational speed U (maximum average geostrophic speed of the closed SSH contours within the eddy; Chelton et al. 2011b) is greater than the translation speed c , $U/c > 1$ (Chelton et al. 2011b). However, the water mass or particles contained within an eddy can pass through the SSH contours (see Fig. 2 and the example at the end of the *Descriptive Statistics of eddies* section) or streamlines (Lipphardt et al. 2008), and the ability of eddies to transport particles could therefore be incorrectly evaluated (Beron-Vera et al. 2008). Typically, Eulerian detected eddy contours stretch and fold over the course of a couple of weeks, even if $U/c > 1$, which results in eddy filamentation (i.e., loss of coherence; Beron-Vera et al. 2013).

Eddy detection with Eulerian methods is limited by the resolution of input data. In this regard, Chelton et al. (2011b) and Le Vu et al. (2018) recommend excluding eddies with radii smaller than 50 km when detection is done using AVISO data with resolution of $1/4^\circ$. By contrast, Abernathey and Haller (2018), after applying the LAVD methodology, excluded eddies with radii smaller than 15 km from $1/6^\circ$ resolution data, and Haller et al. (2016) excluded eddies with radii smaller than 20 km from $1/4^\circ$ AVISO data. Detecting eddies with radii smaller than 50 km is possible because the LAVD method does not depend on an instantaneous description of velocity or SSH fields. This method is based on the integral of the vorticity of advected particles over time (Haller et al. 2016).

On the other hand, coherent Lagrangian eddies, like the ones detected with the LAVD method, generally have a radius that is smaller than the radius of their Eulerian counterpart (Beron-Vera et al. 2008, 2015; Wang et al. 2016; Abernathey and Haller 2018) (Fig. 2). Therefore, to get an idea of the

masa que el remolino es capaz de retener durante su periodo de coherencia. En promedio, los remolinos detectados en el NOGM conservaron $\sim 60\%$ de su masa a lo largo de su periodo de coherencia. En general, no se apreciaron diferencias entre los remolinos ciclónicos y los remolinos anticiclónicos excepto en la zona 1, donde los ciclones tuvieron una ligera tendencia a conservar más masa que los remolinos de las otras zonas (valor de $P < 0.1$). Por otro lado, los remolinos pequeños tendieron a disiparse al perder coherencia, mientras que los remolinos grandes pudieron reagruparse y conformar un nuevo remolino que contenía parte de la masa del remolino anterior y agua del entorno.

DISCUSIÓN

Remolinos del noroeste del golfo de México

Los métodos eulerianos suponen que los remolinos de mesoescala, definidos a partir de contornos de SSH o líneas de corriente (Fig. 2), atrapan y transportan masas de agua por largos periodos de tiempo, particularmente cuando la velocidad de rotación U (el máximo de las velocidades geostroficadas promedio de los contornos cerrados de SSH dentro del remolino; Chelton et al. 2011b) domina sobre la velocidad de traslación c , $U/c > 1$ (Chelton et al. 2011b). Sin embargo, la masa de agua o las partículas contenidas dentro de un remolino pueden atravesar los contornos de SSH (ver Fig. 2 y el ejemplo al final de la sección *Estadística descriptiva de remolinos*) o de las líneas de corriente (Lipphardt et al. 2008), por lo que la capacidad de los remolinos para transportar partículas podría ser evaluada de manera incorrecta (Beron-Vera et al. 2008). Por lo general, los contornos de los remolinos detectados de manera euleriana se estiran y se pliegan en el transcurso de un par de semanas, incluso si $U/c > 1$, lo que conlleva a la filamentación del remolino (i.e., pérdida de coherencia; Beron-Vera et al. 2013).

La detección de remolinos a partir de métodos eulerianos está limitada por la resolución de los datos de entrada. Al respecto, Chelton et al. (2011b) y Le Vu et al. (2018) aconsejan descartar remolinos con un radio inferior a 50 km cuando se detectan con datos de AVISO con una resolución de $1/4^\circ$. De manera contrastante, Abernathey y Haller (2018), aplicando la metodología de LAVD, descartaron remolinos con radio menor que 15 km a partir de datos de $1/6^\circ$ de resolución, y Haller et al. (2016) descartaron los remolinos con radio menor que 20 km a partir de datos de AVISO de $1/4^\circ$. La detección de remolinos con radio inferior a 50 km es posible debido a que el método LAVD no depende de una descripción instantánea de los campos de velocidades o de SSH. Este método se basa en la integral a lo largo del tiempo de la vorticidad de las partículas advectadas (Haller et al. 2016).

Por otra parte, se sabe que los remolinos lagrangianos coherentes, como los detectados con el método LAVD, generalmente tienen un radio menor que el radio de su contraparte

reliability of detecting small eddies with the LAVD method, they were compared with their Eulerian counterpart, which was detected from closed SSH contours. All Lagrangian eddies with radii smaller than 50 km had a Eulerian radii larger than 40 km, and 95% had Eulerian radii larger than 50 km.

According to our analysis, in this region there are more cyclonic than anticyclonic eddies (2.5:1.0). This is consistent with what can be inferred from Figures 3a and 4a in Hamilton (2007). Region C was delimited in zone 2; almost 30% more cyclonic eddies occurred in this region compared to the rest of the zone (Figs. 1, 3d). This allows us to assume that if an oil spill were to occur in this region, it is ~30% more likely that the oil will be trapped and transported inside an eddy as long as the eddy maintains its coherence. In addition, coherent cyclonic eddies have the ability to attract particles whose densities are lower than the density of water (Beron-Vera et al. 2015). Specifically, the LAVD centers are the attractants in these eddies (Haller et al. 2016) and, therefore, it can be hypothesized that a light hydrocarbon (density equal to or less than that of water) will possibly be attracted to the LAVD center of the cyclonic eddy and that this hydrocarbon will be transported until the eddy loses its coherence.

Eddy characteristics

Defining eddy boundaries properly is a challenging task because it depends on the criteria used for doing so (e.g., SSH contours, streamlines, temperature contours, buoy trajectories, etc.). In this study, the eddy boundary (R_b) and R_c , which coincides with the eddy core boundary, were determined using the LAVD method. Together, these 2 rings make it possible to define characteristics of great interest, such as retention time and percentage of retained mass, which are key variables in the dispersion of light particles such as hydrocarbons.

Previous studies such as those by Hamilton (1992, 2007) indicate that some NWGM eddies can have Eulerian durations of up to 6 months, without considering retention/coherence times. A similar study conducted off the east coast of Australia showed that particle retention times within eddies were 24 and 27 d for anticyclones and cyclones, respectively (Cetina-Heredia et al. 2019). Additionally, studies of eddies forming from the retroflexion of the Agulhas Current revealed coherence times between 3 months and 1 year (Wang et al. 2015) and even eddies with coherence times greater than a year and a half (Beron-Vera et al. 2013, Wang et al. 2016). The great variability in coherence times allows us to assume that there is no global pattern and that each zone requires particular analysis.

NWGM eddies retain ~60% of their mass until they lose coherence. Similar studies have shown that eddies detaching from the retroflexion of the Agulhas Current only retain 30% of the mass they initially contained (Wang et al. 2015, 2016),

euleriana (Beron-Vera et al 2008, 2015; Wang et al. 2016; Abernathey y Haller 2018) (Fig. 2). Por lo tanto, para dar una idea de la fiabilidad de la detección de remolinos pequeños con el método LAVD, estos se compararon con su contraparte euleriana, detectada a partir de contornos cerrados de SSH. Todos los remolinos lagrangianos con un radio menor que 50 km tuvieron un radio euleriano mayor que 40 km, y el 95%, un radio euleriano mayor que 50 km.

De acuerdo con el análisis realizado, en esta región hay más remolinos ciclónicos que anticiclónicos (2.5:1.0). Esto es consistente con lo que se puede inferir de las Figuras 3a y 4a de Hamilton (2007). Dentro de la zona 2, se delimitó la región C, en la cual ocurren casi 30% más remolinos ciclónicos que en el resto de la zona (Figs. 1, 3d). Esto permite suponer que, si ocurriese un derrame de hidrocarburo en esta región, es ~30% más probable que el hidrocarburo se quede atrapado dentro de un remolino y que sea transportado mientras el remolino mantenga su coherencia. Adicionalmente, los remolinos ciclónicos coherentes tienen la capacidad de atraer partículas con densidad menor que la densidad del agua (Beron-Vera et al. 2015). Específicamente, los centros de LAVD son los atrayentes en estos remolinos (Haller et al. 2016), y por tanto se puede hipotetizar que un hidrocarburo ligero (densidad igual o menor que la del agua) posiblemente será atraído hacia el centro del LAVD del remolino ciclónico y que dicho hidrocarburo será transportado hasta que el remolino pierda su coherencia.

Características de los remolinos

La definición apropiada de la frontera de los remolinos es una tarea desafiante, ya que depende del criterio que se utilice para hacerlo (e.g., contornos de SSH, líneas de corriente, contornos de temperatura, trayectorias de boyas, etc.). En este estudio, se determinó la frontera del remolino (A_r) y el A_c , el cual coincide con el límite del núcleo del remolino, mediante el uso del método LAVD. En conjunto, estos 2 anillos permiten definir características que son de gran interés, el tiempo de retención y el porcentaje de masa retenida, variables clave en la dispersión de partículas ligeras como hidrocarburos.

En estudios previos como los de Hamilton (1992, 2007) se indican que algunos remolinos del NOGM pueden tener una duración euleriana de hasta 6 meses, sin contemplar los tiempos de retención/coherencia. Un estudio similar realizado en la costa este de Australia mostró que los tiempos de retención de partículas dentro de los remolinos fueron 24 y 27 d para los anticiclones y ciclones, respectivamente (Cetina-Heredia et al. 2019). Adicionalmente, estudios sobre remolinos que se desprenden de la retroflexión de la corriente de Agulhas mostraron tiempos de coherencia de entre 3 meses y 1 año (Wang et al. 2015) e incluso remolinos con tiempos de coherencia superior a un año y medio (Beron-Vera et al. 2013, Wang et al. 2016). La gran variedad en los tiempos de coherencia permite suponer que

suggesting that eddies have a limited capacity to transport mass during their life span. This reinforces the importance of studying eddy mass transport using Lagrangian methods, such as the one used in the present study.

The simultaneous presence of various eddies was observed on several occasions. It is possible that some of these cases correspond to the dipoles/tripoles that have been described in the area (Merrell and Morrison 1981, Merrell and Vázquez 1983, Lipphardt et al. 2008). These structures can favor the interaction among eddies and, consequently, loss of coherence. However, this topic would have to be studied separately with the objective of determining what happens to eddy water mass properties when dipoles or tripoles occur.

These results and their analysis may be of great interest to evaluate transport in the case of oil spills or to study the transport of biota by eddies in the region. For example, knowing coherence times and the percentage of mass retained by NWGM eddies is the beginning for making assertive decisions in the event of an oil spill. Because of this, the relationship between the peripheral radius R_b and its core R_c is a practical way to estimate the percentage of mass retained by an eddy from the moment it is detected to the moment it loses coherence. The eddy parameters reported here can be used as the basis for validating numerical models of circulation in the NWGM.

In summary, the median radii of the NWGM eddies detected in this study vary from ~ 40 km in the shallowest zone to ~ 70 km in the deepest zone. NWGM eddies retain approximately 60% of their initial mass from the moment of their detection until the loss of their coherence. Also, the eddies observed in the region rarely retained their initial mass for more than 60 d. In particular, on average, cyclonic eddies in the region retain their initial mass for ~ 33 d, whereas anticyclonic eddies retain it for ~ 26 d. Finally, there is a region, centered between 94.75° W and 26.75° N, where approximately 30% of the total number of cyclonic eddies detected between the 1,000- and 2,500-m isobaths occurred.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the CONACYT-SENER-Hidrocarburos Sector Fund (project No. 201441). This is a contribution from the Gulf of Mexico Research Consortium (CIGoM). The altimetry products used here were generated by SSALTO/DUACS and are distributed by AVISO, with the support of the National Center for Space Studies (CNES, France). FB thanks José A Zepeda-Domínguez for his suggestions and comments during the writing stage of this manuscript. We appreciate all the comments and suggestions from the anonymous reviewers, which helped to improve the quality of the article.

English translation by Claudia Michel-Villalobos.

no hay un patrón global y que cada zona necesita un análisis particular.

Los remolinos del NOGM conservan $\sim 60\%$ de su masa hasta que pierden su coherencia. Estudios similares han demostrado que los remolinos que se liberan de la retroflexión de la corriente de Agulhas sólo conservan un 30% de la masa que contenían inicialmente (Wang et al. 2015, 2016), lo cual sugiere que los remolinos tienen una capacidad limitada para transportar masa durante su tiempo de vida. Esto refuerza la importancia de estudiar el transporte de masa que realizan los remolinos a partir de métodos lagrangianos, como el utilizado en este trabajo.

Adicionalmente, se observó en diversas ocasiones la presencia simultánea de varios remolinos. Es posible que algunos de estos casos correspondan con los dipolos/tripolos que han sido descritos en la zona (Merrell y Morrison 1981, Merrell y Vázquez 1983, Lipphardt et al. 2008). Estas estructuras pueden favorecer la interacción entre remolinos y, en consecuencia, que ocurra pérdida de coherencia. Sin embargo, este tema tendría que ser estudiado aparte con la intención de determinar lo que sucede con las propiedades de la masa de agua de los remolinos cuando ocurren dipolos o tripolos.

Estos resultados y su análisis pueden ser de gran interés para la evaluación del transporte en caso de derrames de hidrocarburos o para estudiar el transporte de biota por remolinos en la región. Por ejemplo, conocer los tiempos de coherencia y el porcentaje de masa que conservan los remolinos del NOGM es el comienzo para tomar decisiones asertivas en caso de que ocurra un derrame de hidrocarburos. Por todo esto, la relación entre el radio periférico A_r y su núcleo A_c es una manera práctica para estimar el porcentaje de masa que conserva un remolino desde su detección hasta su pérdida de coherencia. Finalmente, los parámetros de los remolinos que aquí se reportan pueden ser utilizados como base para la validación de modelos numéricos de la circulación del NOGM.

En resumen, la mediana de los radios de los remolinos del NOGM detectados en este estudio varían de ~ 40 km en la zona más somera a ~ 70 km en la zona más profunda. Se pudo observar que los remolinos del NOGM retienen aproximadamente el 60% de su masa inicial desde el momento de su detección hasta que pierden su coherencia. También se observó que rara vez los remolinos de la región retienen su masa inicial por más de 60 d. Particularmente, los remolinos ciclónicos de la región, en promedio, retienen su masa inicial por ~ 33 d, mientras que los anticiclónicos la retienen por ~ 26 d. Por último, existe una región, centrada en 94.75° W y 26.75° N, donde ocurren aproximadamente el 30% del total de remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1,000 y 2,500 m.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos (proyecto No.

REFERENCES

- Abernathy R, Haller G. 2018. Transport by Lagrangian vortices in the eastern Pacific. *J Phys Oceanogr.* 48(3):667–685. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0102.1>
- Andrade-Canto F, Sheinbaum J, Zavala-Sansón L. 2013. A Lagrangian approach to the Loop Current eddy separation. *Nonlinear Proc Geoph.* 20(1):85–96. <https://doi.org/10.5194/npg-20-85-2013>
- Beron-Vera FJ, Olascoaga MJ, Goni GJ. 2008. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures. *Geophys Res Lett.* 35(12):L12603. <https://doi.org/10.1029/2008GL033957>
- Beron-Vera FJ, Olascoaga MJ, Haller G, Farazmand M, Triñanes J, Wang Y. 2015. Dissipative inertial transport patterns near coherent Lagrangian eddies in the ocean. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science.* 25(8):087412. <https://doi.org/10.1063/1.4928693>
- Beron-Vera FJ, Wang Y, Olascoaga MJ, Goni GJ, Haller G. 2013. Objective detection of oceanic eddies and the Agulhas Leakage. *J Phys Oceanogr.* 43(7):1426–1438. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0171.1>
- Biggs DC, Fargion GS, Hamilton P, Leben RR. 1996. Cleavage of a Gulf of Mexico loop Current eddy by a deep water cyclone. *J Geophys Res: Oceans.* 101(C9):20629–20641. <https://doi.org/10.1029/96JC01078>
- Cetina-Heredia P, Roughan M, van Sebille E, Keating S, Brassington GB. 2019. Retention and leakage of water by mesoscale eddies in the East Australian Current System. *J Geophys Res: Oceans.* 124(4):2485–2500. <https://doi.org/10.1029/2018JC014482>
- Chelton DB, Gaube P, Schlax MG, Early JJ, Samelson RM. 2011a. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. *Science.* 334(6054):328–332. <https://doi.org/10.1126/science.1208897>
- Chelton DB, Schlax MG, Samelson RM. 2011b. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog Oceanogr.* 91(2):167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
- Condie S, Condie R. 2016. Retention of plankton within ocean eddies. *Global Ecol Biogeogr.* 25(10):1264–1277. <https://doi.org/10.1111/geb.12485>
- Dong C, Liu Y, Lumpkin R, Lankhorst M, Chen D, McWilliams JC, Guan Y. 2011. A scheme to identify loops from trajectories of oceanic surface drifters: An application in the Kuroshio Extension region. *J Atmos Ocean Tech.* 28(9):1167–1176. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-10-05028.1>
- d'Ovidio F, De Monte S, Della-Penna A, Cotté C, Guinet C. 2013. Ecological implications of eddy retention in the open ocean: a Lagrangian approach. *J Phys A: Math Theor.* 46(25):254023. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/46/25/254023>
- Elliott BA. 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *J Phys Oceanogr.* 12(11):1292–1309. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<1292:ARITGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<1292:ARITGO>2.0.CO;2)
- Haller G, Hadjighasem A, Farazmand M, Huhn F. 2016. Defining coherent vortices objectively from the vorticity. *J Fluid Mech.* 795:136–173. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.151>
- Hamilton P. 1992. Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans.* 97(C2):2185–200. <https://doi.org/10.1029/91JC01496>
- Hamilton P. 2007. Eddy statistics from Lagrangian drifters and hydrography for the northern Gulf of Mexico slope. *J Geophys Res: Oceans.* 112(C9):C09002. <https://doi.org/10.1029/2006JC003988>
- 201441). Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Los productos de altimetría utilizados fueron generados por SSALTO/DUACS y son distribuidos por AVISO, con el apoyo del Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES, Francia). FB agradece a José A Zepeda-Domínguez sus sugerencias y comentarios durante la redacción de este manuscrito. Agradecemos todos los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos, los cuales ayudaron a mejorar la calidad del artículo.
-
- Hamilton P, Berger TJ, Johnson W. 2002. On the structure and motions of cyclones in the northern Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans.* 107(C12):3208. <https://doi.org/10.1029/1999JC000270>
- Hamilton P, Lee TN. 2005. Eddies and jets over the slope of the northeast Gulf of Mexico. In: Sturges W, Lugo-Fernandez A (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models.* Vol. 161, Geophysical Monograph Series. Washington DC: American Geophysical Union. p. 123–142. <https://doi.org/10.1029/161GM010>
- Hamilton P, Fargion GS, Biggs DC. 1999. Loop Current eddy paths in the western Gulf of Mexico. *J Phys Oceanogr.* 29(6):1180–1207. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1180:LCEPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1180:LCEPIT>2.0.CO;2)
- Leben RR. 2005. Altimeter-derived Loop Current metrics, in *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models.* In: Sturges W, Lugo-Fernandez A (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models.* Vol. 161, Geophysical Monograph Series. Washington DC: American Geophysical Union. p. 181–202. <https://doi.org/10.1029/161gm15>
- Le Vu B, Stegner A, Arsouze T. 2018. Angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation. *J Atmos Ocean Tech.* 35(4):739–762. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0010.1>
- Lipphardt BL, Poje AC, Kirwan AD, Kantha L, Zweng M. 2008. Death of three Loop Current rings. *J Mar Res.* 66(1):25–60. <https://doi.org/10.1357/002224008784815748>
- Lobel PS, Robinson AR. 1988. Larval fishes and zooplankton in a cyclonic eddy in Hawaiian waters. *J Plankton Res.* 10(6):1209–1223. <https://doi.org/10.1093/plankt/10.6.1209>
- Merrell WJ Jr, Morrison JM. 1981. On the circulation of the western Gulf of Mexico with observations from April 1978. *J Geophys Res: Oceans.* 86(C5):4181–4185.
- Merrell WJ Jr, Vázquez AM. 1983. Observations of changing mesoscale circulation patterns in the western Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans.* 88(C12): 7721–7723. <https://doi.org/10.1029/JC088iC12p07721>
- 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. *J Geophys Res: Oceans.* 123(9):6070–6090. <https://doi.org/10.1029/2018jc013801>
- Nowlin WD Jr, Jochens AE, Reid RO, DiMarco SF. 1998. Texas–Louisiana shelf circulation and transport processes study: synthesis report. Vol. 2, Appendices. New Orleans (LA): US Department of the Interior, Minerals Management Services, Gulf of Mexico OCS Region. 502 p. OCS Study, MMS 98-0036.
- Oey LY, Ezer T, Lee HC. 2005. Loop Current, rings and related circulation in the Gulf of Mexico: A review of numerical models

- and future challenges. In: Sturges W, Lugo-Fernandez (eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*. Vol. 161, Geophysical Monograph Series. Washington DC: American Geophysical Union. p. 31–56.
<https://doi.org/10.1029/161GM04>
- Ohlmann JC, Niiler PP. 2005. Circulation over the continental shelf in the northern Gulf of Mexico. *Prog Oceanogr*. 64(1):45–81.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2005.02.001>
- Ohlmann JC, Niiler PP, Fox CA, Leben RR. 2001. Eddy energy and shelf interactions in the Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans*. 106(C2):2605–2620.
<https://doi.org/10.1029/1999JC000162>
- Okubo A. 1970. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep Sea Res Oceanogr Abstr*. 17(3):445–454.
[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90059-8)
- Sánchez-Velasco L, Lavín MF, Jiménez-Rosenberg SPA, Godínez VM, Santamaría-del-Angel E, Hernández-Becerril DU. 2013. Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer. *Deep Sea Res Part I*. 75:39–51.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.01.009>
- Smith LC, Smith M, Ashcroft P. 2011. Analysis of environmental and economic damages from British Petroleum’s Deepwater Horizon Oil Spill. *Albany Law Review*. 74(1):563–585.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1653078>
- Tenreiro M, Candela J, Sanz EP, Sheinbaum J, Ochoa J. 2018. Near-surface and deep circulation coupling in the western Gulf of Mexico. *J Phys Oceanogr*. 48(1):145–161.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0018.1>
- Vidal VMV, Vidal FV, Hernández AF, Meza E, Zambrano L. 1994. Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *J Oceanogr*. 50(5):559–588.
<https://doi.org/10.1007/bf02235424>
- Vidal VMV, Vidal FV, Pérez-Molero JM. 1992. Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans*. 97(C2):2155–2172.
<https://doi.org/10.1029/91JC00486>
- Wang Y, Beron-Vera FJ, Olascoaga MJ. 2016. The life cycle of a coherent Lagrangian Agulhas ring. *J Geophys Res: Oceans*. 121(6):3944–3954.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011620>
- Wang Y, Olascoaga MJ, Beron-Vera FJ. 2015. Coherent water transport across the South Atlantic. *Geophys Res Lett*. 42(10):4072–4079.
<https://doi.org/10.1002/2015GL064089>
- Weiss J. 1991. The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 48:273–294.
[https://doi.org/10.1016/0167-2789\(91\)90088-Q](https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90088-Q)
- Zavala-Hidalgo J, Romero-Centeno R, Mateos-Jasso A, Morey SL, Martínez-López B. 2014. The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera*. 27(3):317–334.
[https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)

*Received 28 February 2020,
 accepted 15 September 2020.*

SUPPLEMENTARY MATERIAL

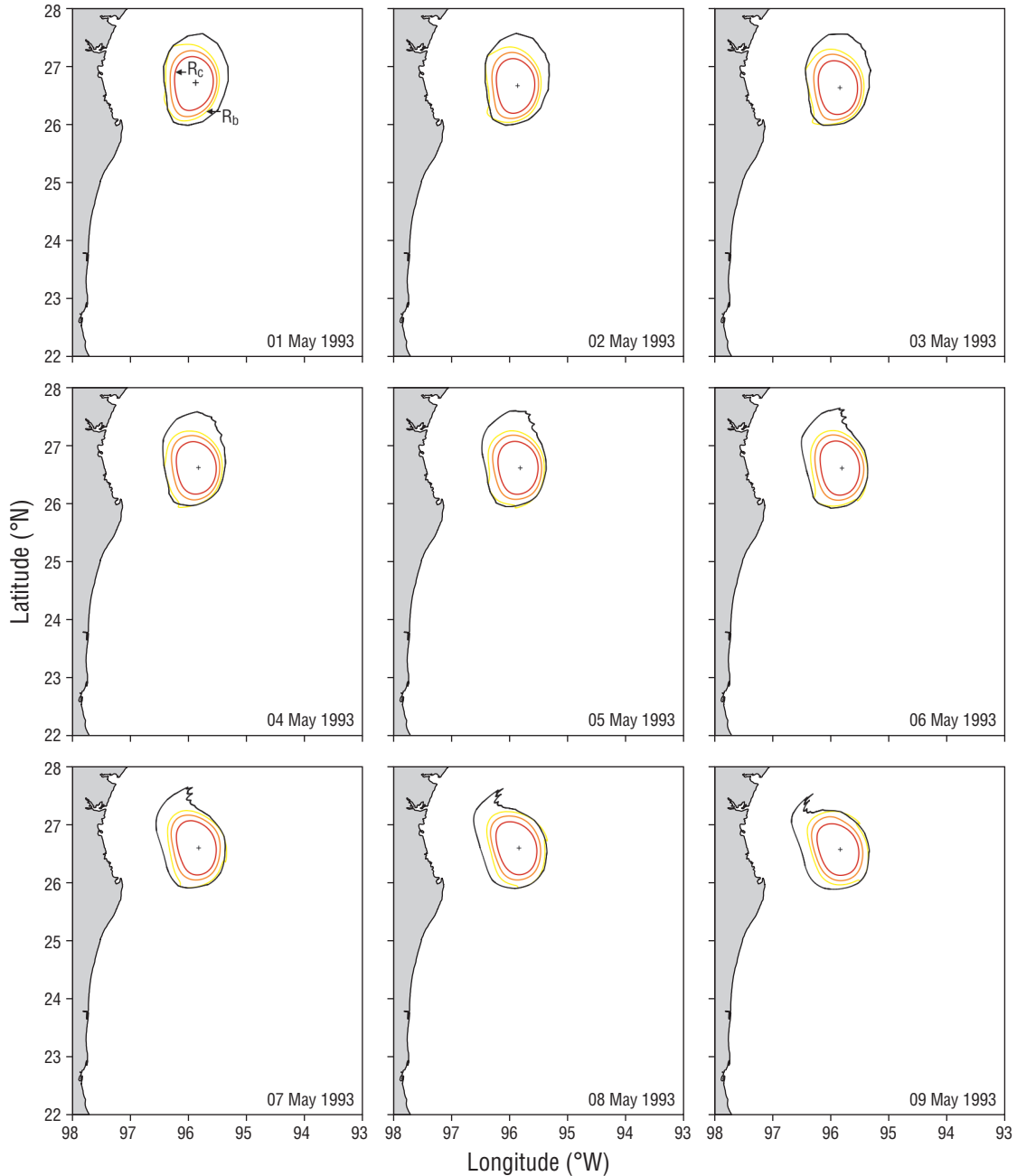


Figure S1. Temporal evolution of a cyclonic eddy detected in the Gulf of Mexico on 1 May 1993 up until 5 days after losing coherence. The black contour represents the eddy contour obtained with the sea surface height data; the yellow contour, the boundary ring (R_b); the orange contour, any limit ring between R_b and the coherence ring (R_c); and the red contour, the R_c . The loss of coherence can be observed when the filamentation of R_c begins (22 d). The center of the eddy was calculated as the geometric center of R_c (black cross).

Figura S1. Evolución temporal de un remolino ciclónico detectado en el golfo de México el 1 de mayo de 1993 hasta 5 días después de perder su coherencia. El contorno negro representa el contorno del remolino obtenido de los datos de la altura del nivel del mar; el contorno amarillo más externo, el anillo de frontera (R_b); el siguiente contorno naranja, un anillo límite cualquiera entre R_b y el anillo de coherencia (R_c); y el contorno rojo, el R_c . La pérdida de coherencia se puede apreciar cuando R_c comienza a filamentarse (22 d). El centro del remolino fue calculado como el centro geométrico de R_c (cruz negra).

Fig. S1 (Cont.)

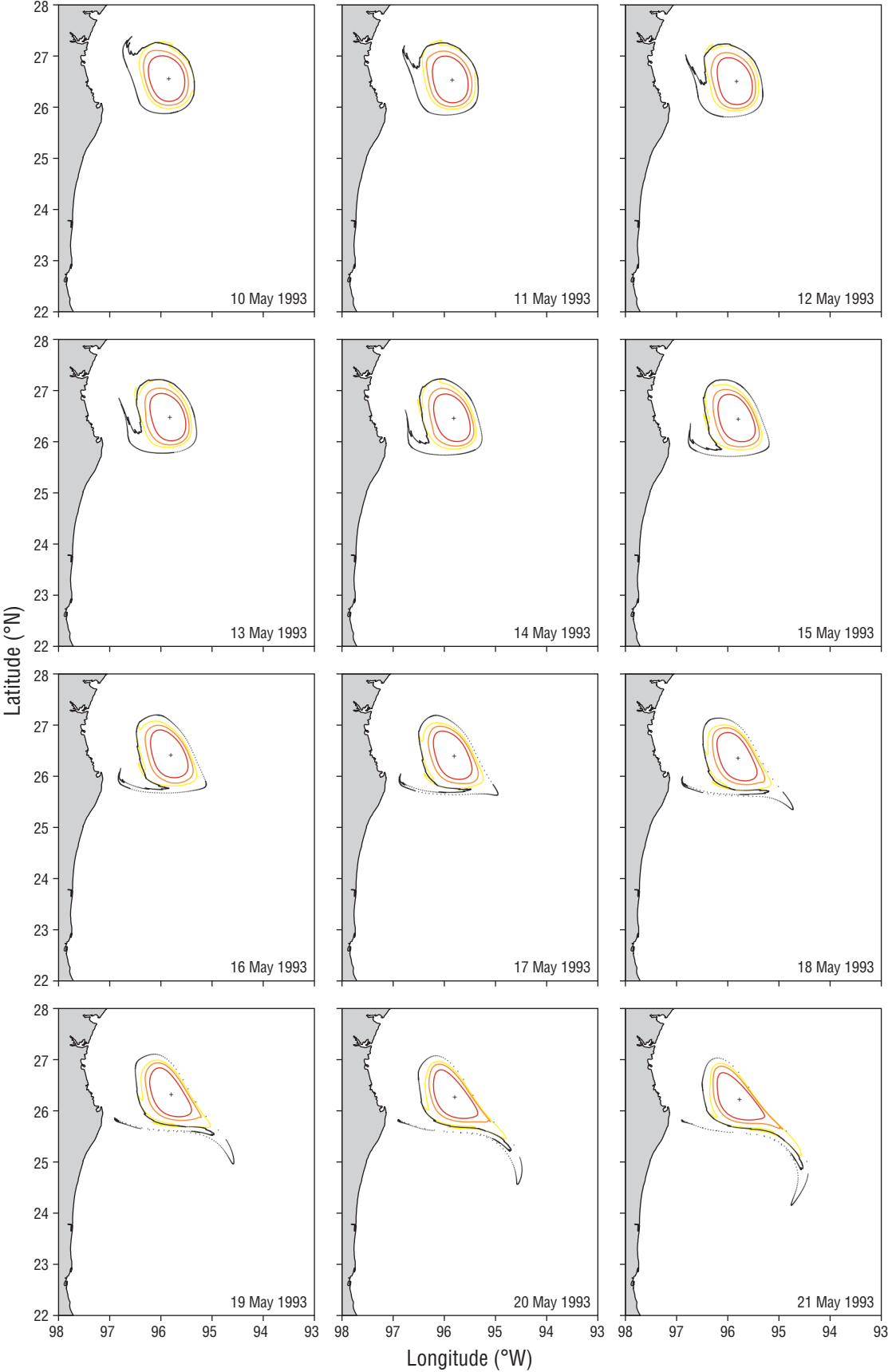


Fig. S1 (Cont.)

