

**UPPER-OCEAN CIRCULATION PATTERNS IN THE  
NORTHERN GULF OF CALIFORNIA,  
EXPRESSED IN ERS-2 SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGERY**

**PATRONES DE CIRCULACIÓN EN LA CAPA SUPERIOR DEL OCEANO  
EN LA PARTE NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA, EXPRESADOS  
EN IMÁGENES DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA DEL ERS-2**

Asdrúbal Martínez-Díaz-de-León

Instituto de Investigaciones Oceanológicas  
Universidad Autónoma de Baja California  
Apartado postal 453  
Ensenada, C.P. 22800, Baja California, México  
\* E-mail: [asdrubal@faro.ens.uabc.mx](mailto:asdrubal@faro.ens.uabc.mx).

*Recibido en noviembre de 2000; aceptado en febrero de 2001*

**ABSTRACT**

ERS-2 Synthetic Aperture Radar (SAR) frames were collected over the northern Gulf of California during winter 1999. The frames, presented here as a single composite image (100 × 300 km), express a mesoscale meander or eddy-like feature, approximately 80 km wide, located close to the peninsula of Baja California. The eddy is expressed as bright, concentric bands that curve in an anticyclonic direction. The location and dimensions of the eddy are in very good agreement with the winter circulation of the northern Gulf of California described by Lavín *et al.* (1997), from the analysis of direct observations using satellite-tracked drifters and hydrographic surveys. The SAR image also depicts other smaller, cyclonic eddy-like features, located close to the mainland, which may be associated with the general circulation induced by the anticyclonic eddy. SAR images, together with the reduced number of *in situ* observations, can provide new and valuable information about the mesoscale circulation of the upper ocean in the Gulf of California, even when cloud cover prevents the use of other remote sensors, such as infrared radiometers and visible imaging systems.

*Key words:* Synthetic Aperture Radar, ocean circulation, northern Gulf of California.

**RESUMEN**

Se tomaron cuadros del Radar de Apertura Sintética (SAR) a bordo del ERS-2 sobre la parte norte del Golfo de California durante el invierno de 1999. Estos cuadros, presentados aquí como una imagen compuesta (100 × 300 km), expresan un meandro o giro de aproximadamente 80 km de diámetro localizado cerca de la península de Baja California. Este giro se aprecia en forma de bandas brillantes concéntricas que se curvan en sentido anticiclónico. La localización y dimensiones del giro concuerdan bien con la circulación invernal en la parte norte del Golfo de California descrita por Lavín *et al.* (1997), a partir del análisis de observaciones directas mediante el uso de boyas de deriva rastreadas por satélite y

por lances hidrográficos. La imagen del SAR muestra también otros giros ciclónicos más pequeños localizados cerca del continente que pudieran estar asociados con la circulación general inducida por el giro anticiclónico. Se concluye que las imágenes del SAR, junto con el reducido número de observaciones *in situ*, pueden proporcionar información nueva y valiosa acerca de la circulación de mesoescala de la capa superior del océano en el Golfo de California, aun cuando las condiciones de nubosidad pudieran no permitir el uso de otros tipos de sensores remotos, tales como radiómetros que operen en el infrarrojo o sistemas ópticos que operen en el visible.

*Palabras clave:* Radar de Apertura Sintética, circulación oceánica, norte del Golfo de California.

## INTRODUCTION

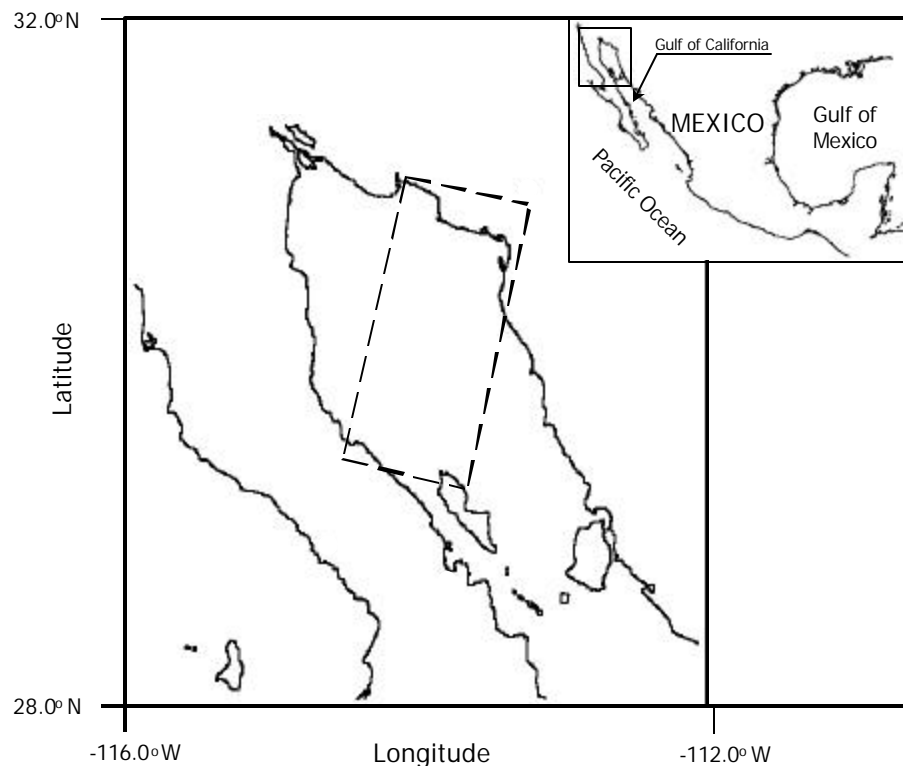
The Gulf of California, a large semi-enclosed sea located in northwestern Mexico, between the Baja California peninsula and the Mexican mainland (fig. 1), is a very complex region of considerable oceanographic and meteorological interest (Roden, 1958; Badan-Dangon *et al.*, 1991). Among the outstanding oceanographic features of the Gulf of California are its large, annual sea surface temperature variability, which is not only confined to coastal areas but also occurs in off-shore regions; its impressive tidal range that increases gradually from the gulf entrance up to Tiburón Island and then rapidly towards the head, where the range of spring tides may be as large as 9 m (Hernández-Ayón *et al.*, 1993); the wind-driven upwelling areas, along the east coast during winter and spring, and on the west coast during summer, have some of the highest surface nutrient concentrations of any of the oceans of the world (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978). Furthermore, the Gulf of California is the largest evaporative basin of the Pacific Ocean (Roden, 1958).

Based on geostrophic calculations, Bray (1988) showed that the surface circulation of the northern Gulf of California consists of a gyre that is cyclonic during the summer and anticyclonic in spring and autumn. Lepley *et al.* (1975) proposed previously a similar circulation pattern from the analysis of the distribution of suspended sediments expressed in visible

## INTRODUCCIÓN

El Golfo de California, extenso mar semi-cerrado localizado al noroeste de México, entre la península de Baja California y la porción continental mexicana (fig. 1), es una compleja región de suma importancia oceanográfica y meteorológica (Roden, 1958; Badan-Dangon *et al.*, 1991). Entre sus características oceanográficas más notables están: la gran variabilidad de sus temperaturas superficiales, no sólo en la zona costera, sino también mar adentro; un impresionante intervalo de mareas que se incrementa gradualmente de la entrada del golfo hasta la Isla Tiburón y después rápidamente hacia su extremo norte, en donde el intervalo de las mareas vivas puede alcanzar hasta 9 m (Hernández-Ayón *et al.*, 1993); sus zonas de surgencia, originadas por el viento a lo largo de su costa oriental en primavera e invierno y de su costa occidental en verano, presentan algunas de las concentraciones de nutrientes superficiales más elevadas de todos los mares del mundo (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978). Además, el Golfo de California es la cuenca evaporítica más grande del Océano Pacífico (Roden, 1958).

Basado en estimaciones geostroficadas, Bray (1988) mostró que la circulación superficial en la parte norte del Golfo de California consiste en un giro ciclónico durante el verano y anticiclónico en la primavera y el otoño. Lepley *et al.* (1975) propusieron un patrón similar de circulación, a partir del análisis de la distribución



**Figure 1.** Map showing the geographical location of the Gulf of California, Mexico. The rectangle with segmented lines defines the area covered by the SAR image of figure 2.

**Figura 1.** Mapa que muestra la localización geográfica del Golfo de California, México. El rectángulo con líneas segmentadas define el área cubierta por la imagen del SAR de la figura 2.

photographs taken by the GEMINI, APOLLO, and SKYLAB astronauts. Evidence of this closed gyre-type of circulation has been observed in infrared satellite images (Lavín *et al.*, 1997; Soto-Mardones *et al.*, 1999). Recently, Lavín *et al.* (1997) analyzed the first direct observations of the circulation in the northern Gulf of California, using satellite-tracked drifters and hydrographic surveys. Their observations indicate that during summer (September/October) there is a well-defined cyclonic gyre that occupies all the central and southern area of the northern gulf, with currents of the order of  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . During winter

de sedimentos en suspensión, observada en fotografías visibles tomadas por los astronautas del GEMINIS, APOLLO y SKYLAB. Se han observado algunas evidencias de este tipo de circulación de giro cerrado en imágenes infrarrojas de satélite (Lavín *et al.*, 1997; Soto-Mardones *et al.*, 1999). Recientemente, Lavín *et al.* (1997) analizaron las primeras observaciones directas de la circulación en la parte norte del Golfo de California, utilizando boyas de deriva rastreadas por satélite y estudios hidrográficos. Sus observaciones indican que en el verano (septiembre/octubre) existe un giro ciclónico bien definido que ocupa toda la

(March/April), an anticyclonic gyre develops, slightly displaced towards the northwest and of weaker circulation than the summer gyre. Due to the scarcity of direct observations, it is not certain if the anticyclonic circulation sampled by Lavín *et al.* is a permanent winter feature of the northern Gulf of California (Lavín *et al.*, 1997). Some explanations for the generation and circulation patterns of these gyres have been obtained from numerical models and the analysis of an historical hydrographical database (L. Carrillo, M.F. Lavín and E. Palacios-Hernández, "Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California", submitted). For example, Beier (1997), and Beier and Ripa (1999) obtained this seasonally reversing circulation using a two-layer linear numerical model driven by forcings that have annual periodicity.

The objective of this paper is, firstly, to show further evidence of the winter anticyclonic circulation pattern in the northern Gulf of California, and secondly, to demonstrate that the Synthetic Aperture Radar (SAR) on board the second European Remote Sensing satellite (ERS-2) can play a valuable role in observing the surface circulation of the Gulf of California.

#### **SAR DATA**

The SAR image presented and discussed in this work (fig. 2) was acquired over the northern Gulf of California by the ERS-2 during its descending track on 27 February 1999, and is the precision image (PRI) product. The image, presented here with a 100-m pixel resolution, covers an area of  $100 \times 300$  km (see fig. 1), and it represents a composite of three consecutive SAR frames.

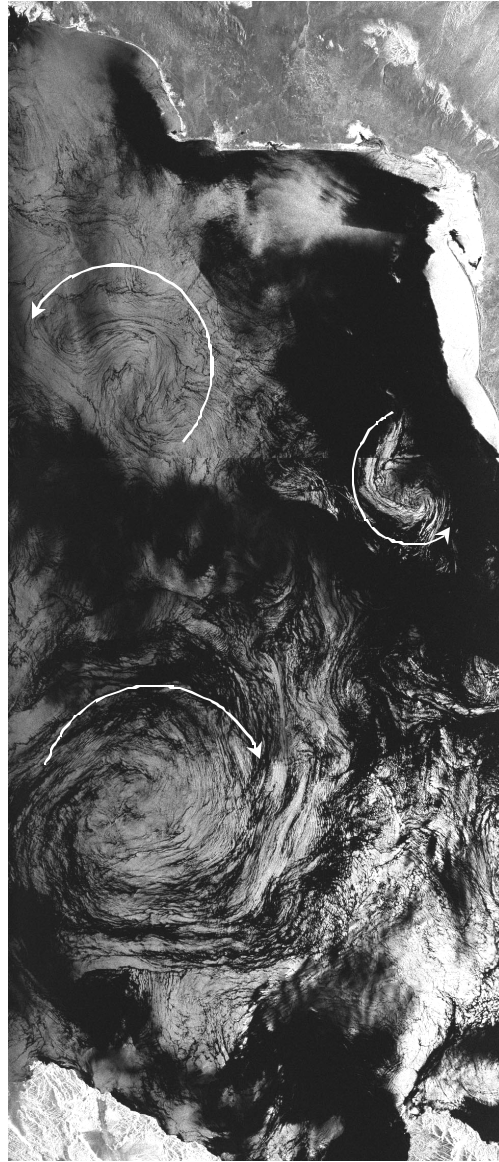
The top edge of the image in figure 2 shows part of Mexico's mainland, and on the bottom the east coast of the Baja California peninsula

porción central y sur del norte del golfo, con corrientes del orden de  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . En invierno (marzo/abril) se desarrolla un giro anticiclónico, ligeramente desplazado hacia el noroeste y con una circulación más débil que el giro estival. Debido a las escasas observaciones directas, no se tiene la certeza de que la circulación anticiclónica sea una característica invernal permanente del norte del Golfo de California (Lavín *et al.*, 1997). Se han dado algunas explicaciones para la generación y los patrones de circulación de estos giros, a partir del análisis de bases de datos hidrográficos históricos (L. Carrillo, M.F. Lavín y E. Palacios-Hernández, "Evolución estacional de la circulación geostrofica en el norte del Golfo de California", sometido) y de modelos numéricos. Por ejemplo, Beier (1997) y Beier y Ripa (1999), usando un modelo numérico lineal de dos capas, obtuvieron esta circulación reversible originada por forzamientos de periodicidad anual.

El objetivo de este documento es, primero, mostrar nuevas evidencias del patrón anticiclónico de circulación invernal en el norte del Golfo de California y, en segundo lugar, demostrar que el Radar de Apertura Sintética (SAR) a bordo del segundo satélite Europeo de Sensores Remotos (ERS-2) puede jugar un papel valioso en la observación de la circulación superficial en el Golfo de California.

#### **DATOS DEL SAR**

La imagen del SAR presentada y discutida en este trabajo (fig. 2) fue tomada sobre la porción norte del Golfo de California por el ERS-2 en su recorrido descendente, el 27 de febrero de 1999, y es el producto conocido como imagen de precisión (PRI). La imagen, presentada aquí con una resolución de pixel de 100 m, cubre un área de  $100 \times 300$  km (fig. 1) y representa la composición de tres cuadros consecutivos del SAR.



**Figure 2.** ERS-2 SAR image of the northern Gulf of California acquired during a descending track on 27 February 1999, at 18:12 UT. The image has a 100-m pixel resolution and covers an area of  $100 \times 300$  km. Its geographical position is noted on figure 1.

**Figura 2.** Imagen de la parte norte del Golfo de California generada por el SAR del ERS-2 en su recorrido descendente del 27 de febrero de 1999, a las 18:12 TU. La imagen tiene una resolución de pixel de 100 m y cubre un área de  $100 \times 300$  km. Su posición geográfica se muestra en la figura 1.

and the northern tip of Ángel de la Guarda Island can be seen. The feature of higher contrast expressed in this image is the meander or eddy-like feature, approximately 80 km wide, located close to the peninsula. The eddy-like feature is expressed as bright, concentric bands that curve in an anticyclonic direction, contrasting with the rather dark image background. The concentric bright lines suggest a possible convergence towards the eddy center. In addition to the mesoscale anticyclonic gyre and located close to the mainland, two other sub-mesoscale cyclonic eddies are manifested in the SAR image. The smallest gyre, approximately 20 km wide, is expressed as bright, curving lines. The other gyre, expressed as dark, meandering lines on a brighter background, is around 30 km wide.

#### **SAR image manifestation of eddies**

SAR images from the ocean surface are formed when the transmitted microwaves are reflected back, or backscattered, to the antenna by resonant interaction with gravity waves of approximately the radar signal wavelength (Wright, 1978), which for the case of ERS-2 SAR is of the order of 0.05 m. In consequence, SAR images may express features or processes that generate, or modulate, the ocean surface centimeter waves. Among these features are eddies that can be manifested in SAR imagery by different modulation mechanisms. More often, eddies show up through wave-current interaction, which outlines the curved shape of the eddy (Johannessen *et al.*, 1991). Eddies having strong thermal signal can be expressed through the wind stress change across the temperature front (Lichy *et al.*, 1981; Beal *et al.*, 1997), or the wind stress change over the entire eddy (Martínez-Díaz-de-León, *et al.*, 1999). Alternatively, eddies can be expressed indirectly through the presence of natural film trapped within spiraling lines

El margen superior de la figura 2 muestra una parte de la porción continental de México y, en el margen inferior, se pueden ver la costa oriental de la península de Baja California y el extremo norte de la Isla Ángel de la Guarda. La estructura más contrastante que se observa en la imagen es el meandro o fenómeno parecido a un remolino, de aproximadamente 80 km de ancho, localizado cerca de la península. Esta especie de remolino se aprecia como una serie de bandas concéntricas brillantes que se curvan en sentido anticiclónico, contrastando con el fondo de la imagen, más bien oscuro. Las líneas concéntricas brillantes sugieren una posible convergencia hacia el centro del remolino. Además del giro anticiclónico de meso-escala, en la imagen del SAR se manifiestan otros dos remolinos a sub-mesoescala, localizados cerca del continente. El giro más pequeño, de aproximadamente 20 km de ancho, se aprecia como líneas curvas brillantes. El otro giro, que se manifiesta en forma de líneas ondulantes oscuras sobre un fondo más brillante, es de alrededor de 30 km de ancho.

#### **Manifestación de remolinos en imágenes de SAR**

Las imágenes de SAR de la superficie oceánica se forman cuando las microondas transmitidas son retornadas a la antena por interacción resonante con las ondas gravitatorias de longitud similar a la longitud de onda de la señal del radar (Wright, 1978) que, en el caso del SAR del ERS-2, es del orden de 0.05 m. En consecuencia, las imágenes de SAR pueden expresar fenómenos o procesos que generan o modulan las ondas oceánicas superficiales del orden de centímetros. Entre estos fenómenos se encuentran remolinos que se pueden manifestar en imágenes de SAR por diversos mecanismos de modulación. Con mayor frecuencia, los remolinos aparecen a través de la interacción onda-corriente, que perfila la forma curva del

associated with the orbital motion of the eddy (Johannessen *et al.*, 1993).

The obvious question is: What mechanisms taking place at the marine boundary layer are responsible for the signature of eddies expressed in figure 2? To explore possible answers, and lacking any *in situ* data, we first consider the average meteorological and oceanographic conditions in the Gulf of California for the time of the year the image was acquired, and then suggest a plausible hypothesis to explain the signature of the eddies expressed in the image.

As already mentioned above, the SAR image in figure 2 was acquired at the end of February, which is the winter season. During winter, winds blow from the northwest, along the gulf's axis, with speeds that can reach 8 to 12 m s<sup>-1</sup>. The winds are coherent over basin scales, and bring cool, dry desert air over the gulf (Badan-Dangon *et al.*, 1991; Douglas *et al.*, 1993). These winds produce strong upwelling along the east coast of the gulf, which is particularly evident in the northern Gulf of California, where pigment concentrations in excess of 10 mg m<sup>3</sup> have been recorded (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). The organic material brought up to the surface can form microlayers of natural film, which in high concentrations can attenuate the centimeter or short gravity waves responsible for the radar signal backscatter. The lack of small waves on the ocean surface will produce dark areas on a radar image, as those seen as a general background in figure 2. On the other hand, the permanence on the ocean of this organic material as a surface film is not only dependent on the film concentration, but also on the wind speed. Some results have shown that, for winds stronger than 7 m s<sup>-1</sup>, the wind-induced ocean surface mixing redistributes the surface slicks preventing the centimeter wave damping (Scott, 1986; Johannessen *et al.*, 1996).

remolino (Johannessen *et al.*, 1991). Los remolinos que tienen una fuerte señal térmica se pueden expresar mediante el cambio en el forzamiento por viento a través del frente térmico (Lichy *et al.*, 1981; Beal *et al.*, 1997) o del cambio en el forzamiento por viento a lo largo de todo el remolino (Martínez-Díaz-de-León *et al.*, 1999). Alternativamente, los remolinos se pueden expresar indirectamente a través de la presencia de una película natural atrapada entre las espirales asociadas con su propio movimiento orbital (Johannessen *et al.*, 1993).

La pregunta obvia es: ¿Cuáles de los mecanismos que tienen lugar en la capa límite del mar son los responsables de las marcas de los remolinos observadas en la figura 2? Para explorar posibles respuestas, y a falta de datos *in situ*, primero se consideran las condiciones meteorológicas y oceanográficas promedio en el Golfo de California para la época del año en que se generó la imagen y, después, se sugiere una hipótesis plausible que pudiera explicar la forma en la que los remolinos aparecen en la imagen.

Como ya se mencionó, la imagen de SAR en la figura 2 fue generada a fines de febrero, en la temporada invernal. En invierno, los vientos soplan del noroeste, a lo largo del eje del golfo, con velocidades que pueden alcanzar de 8 a 12 m s<sup>-1</sup>. Los vientos son coherentes a las escalas de la cuenca y traen aire frío y seco al golfo (Badan-Dangon *et al.*, 1991; Douglas *et al.*, 1993). Estos vientos producen fuertes surgencias a lo largo de la costa oriental, particularmente evidentes en la parte norte del Golfo de California, donde se han registrado concentraciones de pigmento por arriba de 10 mg m<sup>-3</sup> (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). El material orgánico llevado a la superficie puede formar microcapas de película natural que, en grandes concentraciones, pueden atenuar las ondas de centímetros o ondas de gravedad responsables del reflejo de la señal del radar. La ausencia de ondas pequeñas en la superficie

Similar extensions of dark areas, or low backscatter, as those seen in figure 2 can be produced if at the time of acquisition of the image the winds were light. Although there is no *in situ* wind information, the wind speed at the time of acquisition of the image can be obtained from the image itself, making use of the ERS-2 scatterometer wind retrieval model, known as CMOD4 (Lecomte, 1993). After applying CMOD4 to the top-left side of the image, close to the mainland, where the background is more or less homogeneous, and assuming that the wind was blowing from the northwest, a consistent wind speed of  $2.7 \text{ m s}^{-1}$  was obtained. This value is not only below the velocity needed to produce enough mixing in the upper ocean, and to break apart any surface films, but also below the minimum wind speed ( $3.25 \text{ m s}^{-1}$  at 10 m height) required to ensure the generation of the centimeter waves that are responsible for the radar signal backscatter (Doneland and Pierson, 1987). This result, in connection with the possibility that high concentrations of organic material were present on the ocean surface at the time of the image acquisition, could explain the extensive, dark areas expressed as a background in figure 2. However, it is still necessary to provide a good explanation for the signature of the eddies manifested in the radar image.

First the mesoscale gyre is considered, expressed as bright, concentric bands that curve in an anticyclonic direction. A hypothesis is made that this eddy is manifested in the SAR image through changes in the stability of the marine atmospheric boundary layer (MABL). To investigate the spatial distribution of the sea surface temperature (SST) over the northern gulf at the time of acquisition of the SAR image, images of the National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) were analyzed, corresponding to the days before, during and after the acquisition of

oceánica producirá áreas oscuras en una imagen de radar, como las que, en general, constituyen el fondo de la figura 2. Por otra parte, la permanencia de este material orgánico en el océano, en forma de película superficial, no sólo depende de la concentración de la película, sino también de la velocidad del viento. Algunos resultados han mostrado que, para vientos a más de  $7 \text{ m s}^{-1}$ , la mezcla oceánica superficial inducida por el viento redistribuye las capas oleosas de la superficie, evitando el amortiguamiento de las ondas de centímetros de longitud (Scott, 1986; Johannessen *et al.*, 1996).

Se pueden generar áreas oscuras, o de baja reflexión de señal, de extensión similar a las observadas en la figura 2 si, al momento de generar la imagen, los vientos son débiles. Aunque no se cuenta con ninguna información de viento *in situ*, la velocidad de éste al tiempo de generar la imagen se puede obtener de la imagen misma, haciendo uso del modelo de recuperación de viento del dispersómetro del ERS-2, conocido como CMOD4 (Lecomte, 1993). Después de aplicar el CMOD4 a la parte superior izquierda de la imagen, cerca del continente, donde el fondo es más o menos homogéneo, y asumiendo que el viento estaba soplando del noroeste, se obtuvo una velocidad consistente del viento de  $2.7 \text{ m s}^{-1}$ . Este valor no sólo está por debajo de la velocidad necesaria para producir suficiente mezcla en la capa superior del océano y desbaratar cualquier película superficial, sino que también está por debajo de la velocidad de viento mínima requerida para asegurar la generación de ondas de centímetros de longitud ( $3.25 \text{ m s}^{-1}$  a 10 m de altura), responsables de reflejar la señal del radar (Doneland y Pearson, 1987). Estos resultados, en relación con la posibilidad de que altas concentraciones de material orgánico estuvieran presentes en la superficie oceánica al momento de la generación de la imagen, podrían explicar las amplias zonas oscuras en el fondo de la figura 2. Sin embargo, es



the SAR image. Unfortunately, the northern Gulf of California was masked in the imagery by the presence of cloud bands, particularly over the geographical location of the gyre. However, according to Soto-Mardones *et al.* (1999), who analyzed 14 years of SST satellite images for the Gulf of California, this anticyclonic gyre is characterized by showing warmer waters in contrast with the temperature of its surrounding waters. Since SST typically varies over spatial scales smaller than meteorological scales and considering the fact that during winter, winds over the gulf blow from the northwest bringing cool, dry desert air, an unstable MABL over the area influenced by the anticyclonic gyre could be suggested. An unstable MABL means that the air in contact with the gyre is warmer (less dense) than the air above and, in consequence, convective cells are formed. The buoyancy of these convective cells increases the mean surface wind stress, or friction velocity, producing an increase in the spectral density of the centimeter waves responsible for the radar backscatter, and ultimately a brighter signature over the gyre. Beal *et al.* (1997) showed how for constant winds, particularly low as in this case, the radar backscatter increases drastically when the MABL stability changes from stable to unstable. They also found that the dependence of the radar backscatter strength weakens as the wind speed increases.

As can be observed in figure 2, the anticyclonic gyre is not expressed as a homogeneous signature but as a series of bright, concentric bands contrasting on a dark background. This pattern is interpreted as showing that the gyre did not consist of a homogeneous pool of warm water, but of a series of wide, warm filaments of water oriented in the direction of the orbital motion of the eddy. It is also interesting to note how the orientation of these filaments suggests convergence towards the eddy center, as expected in an anticyclonic

necesario dar una buena explicación de las marcas de los remolinos observadas en la imagen del radar.

Primero se considera el giro a mesoescala expresado como bandas excéntricas brillantes que se curvan en sentido anticiclónico. Se formula la hipótesis de que este remolino se manifiesta en la imagen de SAR a través de cambios en la estabilidad de la capa límite océano/atmósfera (MABL, por sus siglas en inglés). Para investigar la distribución espacial de la temperatura superficial del mar (TSM) en el norte del Golfo de California al momento de crear la imagen de SAR, se analizaron las imágenes del radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR, del inglés) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), correspondientes a los días antes, durante y después de generar la imagen de SAR. Desafortunadamente, en estas imágenes, la parte norte del Golfo de California se encontraba cubierto por la presencia de bandas de nubes, en particular sobre la ubicación geográfica del giro. Sin embargo, de acuerdo con Soto-Mardones *et al.* (1999), quienes analizaron 14 años de imágenes de satélite de TSM del norte del Golfo de California, este giro anticiclónico se caracteriza por mostrar aguas más cálidas, contrastando con la temperatura de las aguas que lo rodean. Como la TSM típicamente varía en escalas espaciales menores que las escalas meteorológicas y considerando el hecho de que durante el invierno los vientos en el Golfo de California soplan del noroeste trayendo consigo aire fresco y seco del desierto, se podría sugerir la existencia de una MABL inestable en el área de influencia del giro anticiclónico. Esto significa que el aire en contacto con el giro es más caliente (menos denso) que el aire más arriba, formando, en consecuencia, celdas de convección. La flotabilidad de estas celdas convectivas incrementa el forzamiento medio del viento en la superficie, o la velocidad de fricción, generando un incremento en la

gyre. A circulation feature like this could play an important role in distributing and concentrating chlorophyll *a*, algae and pollutants on the ocean surface. Furthermore, this type of circulation could explain the expression of high pigment concentration plumes elongating from the eastern side of the gulf toward Baja California in the northern gulf, as seen in the winter Coastal Zone Color Scanner imagery analyzed by Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994). Eddy-type circulation also provides an efficient heat mixing mechanism between hot and cold water masses.

Regarding the other two sub-mesoscale, cyclonic eddies expressed in figure 2, it is hypothesized that the formation of these eddies might have been induced by the mesoscale anticyclonic circulation. Since the anticyclonic eddy is not centered in the northern gulf but displaced towards the west, in coincidence with the observations carried out by Lavín *et al.* (1997), it induces a clockwise motion in the waters between the mainland coast and the anticyclonic gyre, which is manifested by the two cyclonic eddies. An explanation of the type of signature of these eddies is that the one expressed as bright, curving lines is manifested in the SAR image through a similar mechanism as the anticyclonic eddy; that is, through an unstable MABL over the gyre, as discussed above.

The other cyclonic gyre, located above the anticyclonic eddy, is made apparent by embedded narrow and dark spiraling lines on a brighter background. Following similar expressions of eddies in SAR imagery, these spiraling lines can be associated with small-scale turbulence aligned in the direction of the orbital motion of the eddy (Vesecky *et al.*, 1982; Johannessen *et al.*, 1996). The turbulence can lead to convective motion in the water that can bring organic material present in the upper layer to the surface, where it can remain as a microlayer of natural surface film,

densidad espectral de las ondas con longitudes de centímetros, responsables del retorno de las señales al radar y, finalmente, de una marca más brillante sobre el giro. Beal *et al.* (1997) mostraron como para vientos constantes, particularmente bajos como en este caso, el retorno de la señal del radar aumenta drásticamente cuando la estabilidad de la MABL cambia de estable a inestable. También encontraron que la dependencia de la intensidad de retorno de la señal del radar se debilita conforme la velocidad del viento se incrementa.

Como se puede observar en la figura 2, el giro anticiclónico no se manifiesta como una marca homogénea sino como una serie de bandas concéntricas brillantes, contrastando con el fondo oscuro. Este patrón se interpreta como una muestra de que el giro no está formado por una masa homogénea de agua caliente, sino que consiste en una serie de filamentos de agua anchos y calientes, orientados en la dirección del movimiento orbital del remolino. Es también interesante notar como la orientación de estos filamentos sugiere convergencia hacia el centro del remolino, como se esperaría en un giro anticiclónico. Un fenómeno de circulación como éste podría jugar un papel importante en la distribución y concentración de clorofila *a*, algas y contaminantes en la superficie oceánica. Además, este tipo de circulación podría explicar la manifestación de plumas de altas concentraciones de pigmentos que se extienden en el norte del Golfo de California, de su margen oriental hacia Baja California, como se ha visto en las imágenes invernales del explorador de colores de la zona costera (Coastal Zone Color Scanner) analizadas por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994). La circulación de tipo remolino puede también proveer eficientes mecanismos de intercambio de calor entre masas de agua calientes y frías.

En relación con los otros dos giros ciclónicos a sub-mesoescala que aparecen en la figura 2, se piensa que la formación de estos

attenuating the centimeter waves and, in turn, reduce the radar backscatter, causing the expression of dark spiraling lines. As discussed above, the wind velocity at the time of acquisition of the image was low, allowing any organic material on the ocean as surface film. Although not discussed in great detail, Lavín *et al.* (1997) also resolved, in their lagrangian observations, other smaller cyclonic and anticyclonic eddies close to the mesoscale anticyclonic gyre. In contrast, the linear numerical simulations of the circulation of the northern gulf does not resolve any sub-mesoscale eddy-type circulation in connection with the anticyclonic eddy developed during the winter.

## CONCLUSIONS

Although the image considered here was acquired three years after the measurements analyzed by Lavín *et al.* (1997), the fact that the dimensions and geographical location of the anticyclonic eddy expressed in the SAR image (fig. 2) are in very good agreement with the dimensions and location of the eddy resolved by Lavín *et al.*, strongly suggests that the anticyclonic circulation expressed in the image is a typical winter season situation of the northern Gulf of California, as suggested already by Soto-Mardones *et al.* (1999) and L. Carrillo *et al.* (submitted).

The synoptic manifestation of eddies, as those resolved in the SAR image considered here, and from which some of their characteristics can be defined, such as rotation direction, horizontal dimensions and possible indications of surface convergence, offers a valuable opportunity for comparison and validation of model simulations of surface-current patterns in the northern Gulf of California.

SAR images, integrated with a reduced number of *in situ* observations, can provide new and valuable information about the mesoscale circulation of the upper ocean in the

remolinos podría haber sido inducida por la circulación anticiclónica de mesoescala. Como el remolino anticiclónico no está centrado en el norte del Golfo de California, sino más bien desplazado hacia el oeste coincidiendo con las observaciones realizadas por Lavín *et al.* (1997), induce un movimiento de las aguas en el sentido de las manecillas del reloj, entre la costa continental y el giro anticiclónico, que se manifiesta como dos remolinos ciclónicos. Una explicación del tipo de marca de estos remolinos es que la que se aprecia en forma de líneas curvas brillantes, se manifiesta en la imagen del SAR a través de un mecanismo similar al del giro anticiclónico, esto es, como una MABL inestable sobre el giro, como se ha discutido anteriormente.

El otro giro ciclónico, localizado sobre el remolino anticiclónico, aparece como líneas espirales angostas y oscuras fijas sobre un fondo más brillante. De acuerdo con manifestaciones similares de remolinos en imágenes de SAR, estas espirales pueden estar asociadas con turbulencia de pequeña escala, alineada en la dirección del movimiento orbital del giro (Vesecky *et al.*, 1982; Johanessen *et al.*, 1996). La turbulencia puede originar un movimiento convectivo de agua capaz de traer el material orgánico de la capa superior a la superficie, donde éste puede permanecer como una microcapa de película natural superficial, atenuando las ondas de centímetros de longitud y, a su vez, reducir el retorno de señal al radar, lo que se manifiesta como líneas espirales oscuras. Como se ha discutido anteriormente, la velocidad del viento al momento de generar las imágenes era baja, permitiendo que cualquier material orgánico pueda formar una película superficial. Aunque no lo discutieron con gran detalle, Lavín *et al.* (1997) también resolvieron en sus observaciones lagrangeanas otros remolinos ciclónicos y anticiclónicos pequeños, cerca del giro anticiclónico de mesoescala. En contraste, las simulaciones numéricas lineales

Gulf of California, even when cloud cover prevents the use of other remote sensors, such as infrared radiometers and visible imaging systems.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work is a contribution to ESA project AO3-190, for which the SAR data were provided by ESA-ESRIN. Funding was provided by CONACYT and UABC, Mexico, through contracts I-29866-T, 980232-P and 2-1-201-3-003-4-4048.

#### REFERENCES

- Álvarez-Borrego, S., Rivera, J.A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M.J. and Schwartzlose, R.A. (1978). Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5(2): 53–71.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A. and Winant, C.D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 96: 16877–16896.
- Beal, R.C., Kudryavtsev, V.N., Thompson, D.R., Grodsky, S.A., Tilley, D.G., Dulov, V.A. and Graber, H.C. (1997). The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream. *J. Geophys. Res.*, 102: 5799–5814.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 615–632.
- Beier, E. and Ripa, P. (1999). Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 29: 305–311.
- Bray, N.A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 4993–5020.
- Doneland, M.A. and Pierson, W.J. (1987). Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry. *J. Geophys. Res.*, 92: 4971–5029.
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K. and Reyes, S. (1993). The Mexican monsoon. *J. Climate*, 6: 1665–1677.

de la circulación en el norte del Golfo de California no resuelven ninguna circulación de sub-mesoescala tipo remolino con respecto al giro anticiclónico desarrollado en invierno.

#### CONCLUSIONES

Aunque la imagen aquí considerada fue generada tres años después de las mediciones analizadas por Lavín *et al.* (1997), el hecho de que las dimensiones y la ubicación geográfica del giro anticiclónico expresadas en la imagen de SAR (fig. 2) coincidan con las dimensiones y ubicación del giro resuelto por estos mismos autores, sugiere fuertemente que la circulación anticiclónica expresada en la imagen es una situación invernal típica de la parte norte del Golfo de California, como ya lo han sugerido Soto-Mardones *et al.* (1999) y L.Carrillo *et al.* (sometido).

La manifestación sinóptica de giros, como los resueltos en la imagen de SAR aquí considerada y de la que se pueden definir algunas características tales como dirección de rotación, dimensiones horizontales y posibles indicios de convergencia superficial, ofrece una valiosa oportunidad para comparar y validar simulaciones de patrones superficiales de corriente en el norte del Golfo de California.

Las imágenes de SAR, integradas con un reducido número de observaciones *in situ*, pueden proveer nueva y valiosa información acerca de la circulación a mesoescala de la capa superior del océano en el Golfo de California, aun cuando la cobertura de nubes evite el uso de otros sensores remotos, tales como los radiómetros infrarrojos y los sistemas de imágenes visibles.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, cuyos datos de SAR fueron aportados por ESA-ESRIN, es una contribución al proyecto ESA AO3-190. Se recibió

- Hernández-Ayón, J.M., Galindo-Bect, M.S., Flores-Báez, B.P. and Álvarez-Borrego, S. (1993). Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 37: 593–602.
- Johannessen, J.A., Shuchman, R.A., Johannessen, O.M., Davison, K.L. and Lyzenga, D.R. (1991). Synthetic aperture radar imaging of upper ocean circulation features and wind fronts. *J. Geophys. Res.*, 96: 10411–10422.
- Johannessen, J.A., Roed, L.P. and Wahl, T. (1993). Eddies detected in ERS-1 ASR images and simulated in reduced gravity model. *Int. J. Remote Sensing*, 14: 2203–2213.
- Johannessen, J.A., Shuchman, R.A., Digranes, G., Lyzenga, D.R., Wackerman, C., Johannessen, O.M. and Vachon, P.W. (1996). Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS-1 synthetic aperture radar. *J. Geophys. Res.*, 102: 6651–6667.
- Lacomte, P. (1993). CMOD4 model description. European Space Agency, ESRIN, Italy, Publication ER-TN-ESA-GP-1120, 32 pp.
- Lavín, M.F., Durazo, R., Palacios, E., Argote M.L. and Carrillo, L. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27(10): 2298–2305.
- Lepley, L.K., Vonder Haar, S.P., Hendrickson, J.R. and Calderón-Riveroll, G. (1975) Circulation in the northern Gulf of California from orbital photographs and ship investigations. *Ciencias Marinas*, 2(2): 86–93.
- Lichy, D.E., Mattie, M.G. and Mancini, L.J. (1981). Tracking of a warm water ring. In: R.C. Beal, P.S. DeLeonibus and I. Ktz (eds.), *Spaceborne Synthetic Aperture Radar for Oceanography*. John Hopkins Univ. Press, Baltimore, pp.171–182.
- apoyo financiero del CONACYT y la UABC, México, a través de los contratos I-29866-T, 980232-P y 2-1-201-3-003-4-4048.

Traducido al español por Manuel Gardea.

- 
- Martínez-Díaz-de-León, A., Robinson, I.S., Ballesterio, D. and Coen, E. (1999). Wind-driven ocean circulation features in the Gulf of Tehuantepec, Mexico, revealed by combined SAR and SST satellite sensor data. *Int. J. Remote Sensing*, 20: 1661–1668.
- Roden, G.I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Sci.*, 12(1): 21–45.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994). The 1982–1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7423–7431.
- Scott, J.C. (1986). Surface films in oceanography. ONRL Workshop Rep. C-11-86, Off. Nav. Res., London, pp. 19–34.
- Soto-Mardones, L., Marinone S.G. and Parés-Sierra, A. (1999). Time and spatial variability of sea surface temperature in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(1): 1–30.
- Vesecy, J.F. and Stewart, R.H. (1982). The observations of ocean surface phenomena using imagery from the SEASAT synthetic aperture radar: An assessment. *J. Geophys. Res.*, 87: 3397–3430.
- Wright, J.W. (1978). Detection of ocean waves by microwave radar: The modulation of short gravity-capillary waves. *Boundary Layer Meteorol.*, 13: 87–105.