

TELEDETECCIÓN DE PLUMAS DE MATERIAL SUSPENDIDO INFLUENCIADAS POR ESCORRENTÍA EN EL SUR DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Martínez Flores, G., E.H. Nava Sánchez & O. Zaitzev

Departamento de Oceanología, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Col. Playa Palo de Santa Rita. 23096, La Paz, BCS, Tel. (612)122-5366, Fax (612)122-5322. email: gmflores@ipn.mx, enava@ipn.mx, ozaytsev@ipn.mx

RESUMEN. Los procesos de escorrentía de las cuencas de drenaje hacia los mares costeros afectan de manera significativa las propiedades ópticas de sus aguas, y tienen implicaciones importantes en términos de aporte de nutrientes a la zona eufótica. En este trabajo se analizan datos de precipitación diaria en las cuencas que drenan al Golfo de California durante 2004-2008, ubicando las desembocaduras de sus ríos activadas por procesos de escorrentía en periodos específicos. Esta acotación espacio-temporal sitúa la selección de bandas de imágenes MODIS-Aqua nivel 1B, a las que se aplican algoritmos para detectar el material suspendido total (MST) integrado en la capa superficial del mar. De la precipitación total en estas cuencas en el periodo de estudio, el porcentaje de contribución de cada año (2004-2008) fue del 32, 14, 18, 16 y 20% respectivamente. Consecuentemente, durante el verano de 2004 los efectos de las escorrentías fueron más evidentes en las imágenes de MST. Los resultados muestran plumas de material suspendido asociadas a las desembocaduras de los principales ríos del margen continental, algunas de las cuales alcanzan distancias de ~60-100 km desde la costa. Destaca una pluma detectada en agosto de 2004, con una cobertura de 44,000 km², extendiéndose a ~300 km de la costa de Nayarit, área cercana a las desembocaduras de los Ríos Acaponeta, San Pedro, Santiago y Ameca. En general, la distribución de estas plumas es controlada por la circulación de mesoescala, siendo relevante el efecto combinado de giros anticiclónicos al norte de las desembocaduras y ciclónicos al sur de las mismas.

Palabras clave: Golfo de California, material suspendido, cuencas de drenaje, sensores remotos.

Remote sensing of suspended matter plumes triggered by runoff in the south Gulf of California

ABSTRACT. Runoff from watersheds draining towards the coastal seas affects significantly the optical properties of these waters, and also has important implications in terms of supply of nutrients to the euphotic zone. This paper analyzes daily precipitation data in the basins draining into the Gulf of California during 2004-2008, locating the river mouths activated by runoff processes on specific periods. This spatial and temporal demarcation sets the selection of MODIS-Aqua image bands level 1B, which applies algorithms in order to detect the total suspended matter (MST from the Spanish acronym) integrated in the surface layer of the sea. From total precipitation in these basins in the study period, the percentage of contribution per year (2004-2008) was 32, 14, 18, 16 and 20% respectively. Consequently, during the summer of 2004 effects of runoff were most evident in MST images. The results show plumes of suspended matter associated with the discharge areas of the main rivers from the continental margin, and some of them reach distances up to ~60-100 km from the coastline. Standing out is a plume detected in August 2004, with coverage of 44,000 km² extending ~300 km from the Nayarit coastline, in the area in front of the river mouths of Acaponeta, San Pedro, Santiago and Ameca. In general, the distribution of these plumes is controlled by the mesoscale circulation of the Gulf, being relevant the combined effect of anticyclonic eddies north of the river mouths and cyclonic eddies south of them.

Keywords: Gulf of California, suspended matter, drainage basins, remote sensing.

Martínez Flores, G., E.H. Nava Sánchez & O. Zaitzev. 2011. Teledetección de plumas de material suspendido influenciadas por escorrentía en el sur del Golfo de California. *CICIMAR Océánides*, 26(1): 1-18.

INTRODUCCIÓN

Las observaciones del color del océano tienen gran potencial para estudiar la conectividad entre litorales y zonas costeras mediante el rastreo de la dispersión de las plumas de ríos. La descarga de ríos juega un papel muy importante en la productividad, ciclo hidrológico y estabilidad termodinámica de los mares costeros. La identificación de las plumas de los ríos, variaciones en su extensión, patrones de dispersión y sus tasas de mezcla con aguas oceánicas es crítica en todos los aspectos de la

oceanografía regional y de la plataforma continental (Lohrenz *et al.*, 1990).

Generalmente el interés por evaluar el material suspendido total (MST) radica en que es considerado un parámetro fundamental de la calidad del agua, el cual muchas veces está relacionado con las prácticas de uso de suelo y con el manejo de las cuencas de drenaje. En algunos países se han establecido cargas máximas totales diarias para un gran número de contaminantes, entre los cuales la concentración de material suspendido o turbidez

ha sido utilizado como indicador (Acker *et al.*, 2005). Trabajos como el de Ritchie y Cooper (2001) enfocan su interés en el uso de datos satelitales para el monitoreo de cargas máximas de MST.

Las propiedades ópticas de las plumas de material suspendido generadas por escorrentía, así como las de aguas costeras turbias, no sólo dependen del fitoplancton y sus productos de degradación, sino también de otros constituyentes, tales como la materia particulada de origen terrígeno y material orgánico disuelto de color (CDOM). Por el contrario, en aguas oceánicas estas propiedades dependen primordialmente del fitoplancton y sus productos. A partir de este concepto Morel y Prieur (1977) propusieron el esquema de clasificación de las aguas Caso 1 y Caso 2, que a su vez establece las bases para el desarrollo de algoritmos regionales. Normalmente las plumas de material suspendido activadas por escorrentía tienen propiedades ópticas muy diferentes a las del agua circundante, lo que hace posible su identificación, delimitación y seguimiento con el uso de datos del color del mar captados con sensores remotos. Varios estudios han examinado la dispersión ocasionada por las descargas de grandes ríos empleando imágenes de satélite, como los complejos patrones de dispersión del Amazonas en el Océano Atlántico (Muller-Karger *et al.*, 1995; Hu *et al.*, 2004), y los patrones estacionales de dispersión de las descargas de Río Orinoco en el Caribe (Muller-Karger *et al.*, 1989; Muller-Karger & Varela, 1990). Del Castillo *et al.* (2000) usaron imágenes CZCS (Coastal Zone Color Scanner) y SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) para demostrar que la pluma del Río Mississippi no siempre se dispersa al W de su delta, sino que también hacia el este y sur del Golfo de México, alcanzando los Cayos de Florida y la costa este de Estados Unidos.

Un rasgo importante de la circulación hidrodinámica en la región sur del Golfo de California (GC) está relacionado con la existencia de los giros geostroficados de mesoescala (Figueroa *et al.*, 2003; Marinone, 2003). A pesar de que las dimensiones horizontales y el sentido de rotación de los giros son variables, éstos pueden considerarse como un mecanismo importante de la conectividad entre las aguas costeras y oceánicas forzando el transporte de material biológico y terrígeno hacia el mar abierto. En las zonas costeras el transporte de MST es más eficiente por procesos relacionados con la precipitación, por lo que es necesario integrar datos sobre eventos de lluvia y escorrentía en el estudio de trayectorias de transporte (Schlüssel, 1996). El en-

tendimiento de la conexión entre las áreas costeras y oceánicas en términos de transporte de larvas o de organismos es un requerimiento fundamental para el manejo de pesquerías y biodiversidad marina (Ogden, 1997; Roberts, 1997; Marinone *et al.*, 2008). Esta conectividad en escalas de decenas a cientos de kilómetros, originada por procesos de escorrentía, es también importante con respecto a la dispersión de contaminantes y patógenos.

Maske (2001) intentó detectar derrames pluviales en la zona costera del GC durante "El Niño" 1997-1998 con imágenes SeaWiFS, motivado por la posibilidad de estimar la cantidad de agua dulce transportada, la erosión asociada con el derrame y la introducción local de nutrientes inorgánicos en el golfo, sin embargo el autor menciona que por problemas de calibración de las imágenes no fue posible la detección de plumas durante ese periodo.

Actualmente, la determinación de concentraciones de MST de forma global y precisa con datos de sensores remotos sigue siendo un reto, sin embargo se han logrado buenas aproximaciones en aplicaciones específicas con datos provenientes de una variedad de sensores de diversa precisión radiométrica, resolución espacial y temporal, como los transportados a bordo de los satélites Landsat, Spot, NOAA, SeaStar, Aqua, Terra (Acker *et al.*, 2005), entre otros. Algunos sensores como el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, a bordo de los satélites de la serie NOAA) carecen de buena resolución espacial para este tipo de aplicaciones (1.1 km), lo que impide su aplicación en cuerpos de agua pequeños (como lagunas costeras). Otros sensores como los instalados en satélites de la serie Landsat (MSS, Multispectral Scanner; TM, Thematic Mapper; ETM+, Enhanced Thematic Mapper), tienen baja resolución temporal (revisita cada 16 días), lo que imposibilita el monitoreo continuo. En contraste, el sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Aqua y Terra, ofrece buena resolución temporal de dos imágenes diarias, y una resolución espacial alta para aplicaciones marinas (250, 500 y 1000 m en la región visible e infrarroja del espectro electromagnético). La disponibilidad de imágenes de buena calidad radiométrica y de resoluciones espaciales mayores a 1 km hace posible la determinación del material suspendido en cuerpos costeros relativamente pequeños.

El objetivo principal de este trabajo es obtener evidencia de los efectos de eventos de escorrentía de las principales cuencas que desembocan al Golfo de California, en la ge-

neración de plumas de turbidez, así como determinar su extensión y posibles trayectorias, utilizando datos del sensor MODIS-Aqua y de boyas de deriva. Para ello, es necesario incluir información sobre la distribución espacio-temporal de la precipitación en el área y periodo de estudio (2004-2008), así como interpretar las posibles causas de su variación. En este sentido, una de las manifestaciones más importantes a considerar en el acoplamiento océano-atmósfera en el Pacífico Ecuatorial es el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) (Folland *et al.*, 1999), por ser la principal causa de la variabilidad climática global (Trenberth, 1997), particularmente en los trópicos, donde éste tiene influencia en la precipitación pluvial. En México, los efectos del ENSO influyen en el aumento de la temperatura y nivel del mar, así como en las variaciones interanuales de las condiciones climáticas de prácticamente toda la costa W del país (Martínez, 2006). El Monzón de América del Norte (MAN) es otro fenómeno de circulación atmosférica responsable de la variabilidad estacional de la precipitación en el noroeste de México (Turrent, 2009). El estudio de los mecanismos que modelan la variabilidad interanual de estos fenómenos es un tópico muy importante desde el punto de vista del balance hídrico de cuencas. Cabe señalar que aunque la descarga de una cuenca depende en gran medida de la precipitación, existen muchos otros factores que intervienen en su gasto, como la infraestructura hidráulica, la pendiente del terreno, tipo y uso de suelo (factor de infiltración), evaporación, evapotranspiración, etc.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Golfo de California (GC) es el único mar interno del Pacífico Oriental, la región pesquera más importante de México y uno de los sistemas marinos más observados por el sector de conservación a nivel mundial (Lluch-Cota *et al.*, 2007). Se considera su límite Sur como la línea imaginaria de aproximadamente 500 km entre Cabo Corrientes, Jalisco y Cabo San Lucas, Baja California Sur (Fig. 1).

El clima presenta un comportamiento heterogéneo en las entidades federativas que rodean el golfo. De manera general, Baja California, Baja California Sur y Sonora presentan climas de tipo secos, semisecos, secos cálidos y secos muy cálidos con bajas precipitaciones pluviales que oscilan entre los 200 y 600 mm anuales, descendiendo hasta 100 mm en algunas partes como el Desierto de Altar y la costa oriental de Baja California, mientras que Nayarit, Sinaloa y Jalisco tienen climas tropicales lluviosos y templados lluviosos (éste último se presenta en la Sierra Madre Occidental,

norte de Sonora y noroeste de Baja California en las zonas serranas) con precipitaciones que varían de 600 a 1000 mm de lluvia al año (Arias-Patrón, 2005).

La serranía que recorre longitudinalmente la Península de Baja California, divide su territorio en dos franjas desiguales, una ancha que corresponde a la vertiente del Océano Pacífico y una estrecha, que envía sus aguas al GC. Esta última es tan angosta que sólo existen corrientes menores, casi siempre estacionales (Tamayo, 1965). En el margen continental del GC, las unidades hidrológicas más amplias se dividen en dos provincias: sierra y planicie costera. La mayor cantidad de agua procede de las captaciones en la primera, escurriendo fundamentalmente hacia los tercios medio y sur de la región en la segunda. La estructura montañosa de la región propicia un curso accidentado de los ríos, los que al descender de la Sierra Madre Occidental después de recorrer amplias zonas altas, se vierten rápidamente hacia las planicies costeras. Parte del curso de estas corrientes son aprovechadas en la agricultura, que se desarrolla en altos valles y zonas planas cercanas al litoral. Los principales ríos de la región tienen un gasto medio anual de 7.2 a 88.5 m³ s⁻¹, incrementándose significativamente en verano, especialmente durante eventos de tormentas. La red hidrológica drena hacia el GC a través de 34 cuencas, de las cuales las más importantes se ubican al sur de Sonora, Sinaloa y Nayarit, zona en la que enfocamos este trabajo. El gasto medio anual de los ríos que desembocan en el área de estudio es de ~53 m³ s⁻¹ (CNA, 1998; 2004).

Se examinaron los registros de precipitación diaria en las 34 cuencas de drenaje que desembocan al GC, en el periodo 2004-2008, con la finalidad de identificar los días y zonas con mayor probabilidad de producir aportes de material suspendido por escorrentía. Para ello se utilizaron los datos de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM), en particular los estimados con el algoritmo 3B42 (ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/TRMM/Gridded/3B42_V6), que provee datos de precipitación cada tres horas a una resolución espacial de 0.25° (NASA, 2007). Éstos se procesaron con MATLAB 7.8.0 para obtener los acumulados anuales y mensuales de precipitación en cada ubicación (celda) de la malla. La Figura 1 muestra la delimitación de las cuencas y la ubicación de las celdas de precipitación. Los acumulados, así como los polígonos que delimitan de las cuencas de drenaje (CNA, 1998) se trataron con ArcGIS 9.2 para obtener la variación temporal de precipitación por cuenca.

Se obtuvieron del servidor de CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad) las imágenes MODIS-Aqua (ftp://200.12.166.180/BIN_level1b) correspondientes a los periodos de mayor precipitación y se identificaron las desembocaduras activadas por procesos de escorrentía. Esta revisión permitió circunscribir el área de influencia de estos eventos en un polígono que comprende de la boca a la región central del GC (zona sombreada en la Fig. 1).

El rango espectral cubierto por los 36 canales de las imágenes MODIS es de 0.4 a 14.4 μm . En el servidor de CONABIO los primeros siete canales (de 250 y 500 m de resolución espacial) están almacenados en archivos individuales, y los siguientes 29 (de 1000 m) en uno sólo. Se desarrolló un programa (IDL 6.2) para realizar los procesos de corrección atmosférica por el método sustracción de cuerpos oscuros (Chuvieco, 2002), georreferenciación (mediante la transformación de los canales a

archivos GeoTIFF, Ritter & Ruth, 1995, 1997; Yang, 2006) y extracción de la región de interés para aplicar los siguientes algoritmos:

a) Sedimento en suspensión, Tassan (1994):

$$s = a_1 + a_2 \text{ Log}(X_s)$$

donde a_1 y a_2 son los coeficientes de correlación ($a=[1.83, 1.26]$) y

$$X_s = (R(\lambda_{555}) + R(\lambda_{670})) \left[\frac{R(\lambda_{490})}{R(\lambda_{555})} \right]^{-0.5}$$

siendo $R(\lambda_r)$ los valores de reflectancia a las longitudes de onda r (nm).

b) Material suspendido total, Miller & McKee (2004):

$$\text{MST} = b_1 b_2 R(\lambda_{645})$$

donde b_1 y b_2 son los coeficientes de correlación ($b=[-191, 1140.25]$) y $R(\lambda_{645})$ la reflectancia a la longitud de onda de 645 nm.

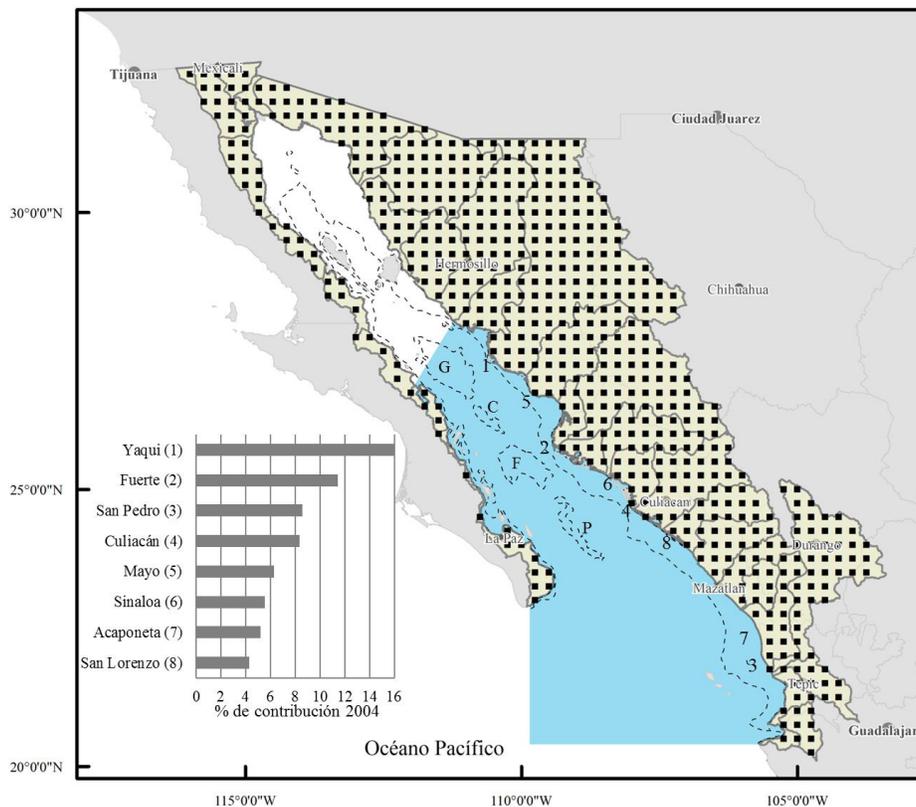


Figura 1. Delimitación de las cuencas que drenan al Golfo de California (CNA, 1998); localización de los registros de precipitación (TRMM 3B42 v6) (puntos); área seleccionada para la adquisición de imágenes MODIS durante los periodos de mayor precipitación y gráfica del porcentaje de precipitación por cuenca (ocho principales) con respecto al total en el 2004. Se muestra la ubicación de las cuencas Guaymas (G), Carmen (C), Farallón (F) y Pescadero (P), así como la isobata de los 200 m.

Figure 1. Gulf of California drainage basins boundaries (CNA, 1998); location of rainfall records (TRMM 3B42 v6) (points), selected area for MODIS images acquisition during periods of major rainfall and percentage graph of rainfall per basin (eight principal) with respect to the total in 2004. Shows the location of the Guaymas (G), Carmen (C), Farallon (F) and Pescadero (P) basins, as well as the 200 m isobath.

c) Cobertura de nubes, Ackerman *et al.* (1997):

$$C = 0.9 < \frac{R(\lambda_{870})}{R(\lambda_{660})} < 1.1$$

donde C es una variable booleana que toma el valor de 1 (nube) cuando el cociente está en el rango de 0.9 a 1.1, y 0 (sin cobertura de nubes) cuando está fuera de este rango.

Los resultados de estos algoritmos se almacenaron como capas de matrices tridimensionales georreferenciadas para su posterior análisis, a las que se hará referencia como imágenes de MST. La visualización de estas capas en su conjunto, se implementó en IDL 6.2, asignando a cada algoritmo un canal de video (rojo, verde y azul) para generar composiciones de color, que posteriormente se trataron con ArcGIS 9.2 para su integración con datos de trayectorias de boyas de deriva y de viento. Es importante señalar que los algoritmos empíricos utilizados para generar las imágenes de MST, fueron diseñados originalmente para otras regiones. Para cuantificar concentraciones absolutas en nuestra zona de estudio será necesario llevar a cabo un proceso de calibración con datos *in situ*, así como una evaluación de las propiedades ópticas en la región (Pegau *et al.*, 1999; Cervantes-Duarte *et al.*, 2000), con la finalidad de establecer la relación entre estas propiedades y los datos obtenidos con sensores remotos, tarea que está más allá de los alcances de este trabajo, por lo que estas imágenes representan únicamente índices de MST.

Se utilizaron datos de trayectorias de boyas del Programa Global de Boyas de deriva (Global Drifter Program, GDP) de la NOAA (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac>), para comparar sus desplazamientos y velocidades con la ubicación de las plumas de MST en las imágenes tratadas. De manera complementaria se utilizaron datos QuikSCAT para observar las condiciones del viento durante el registro de trayectorias de las boyas y en los días de adquisición de las imágenes MODIS.

Con el objetivo de observar las variaciones en la distribución de turbidez durante la época en la que se detectó la mayor cobertura de MST, se utilizaron imágenes promedio de ocho días del coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (K490), con resolución espacial de 4 km, obtenidas del sitio de la NASA (<ftp://oceans.gsfc.nasa.gov/MODISA>). Este promedio de ocho días tiene el efecto favorable de disminuir la cobertura de nubes, aunque por su baja resolución espacial, sólo permite dar seguimiento a las estructuras de mesoescala.

El valor de K490 indica la claridad de la columna de agua, es decir el grado de penetración de la luz visible en el rango del azul al verde (Mueller, 2000). En este trabajo, K490 se utiliza como indicador de la turbidez del mar, y se compara con datos de temperatura superficial del mar y de clorofila-a, de la misma resolución espacial (4 km) y temporal (promedios de 8 días), disponibles también del sitio de la NASA.

RESULTADOS

Precipitación por cuenca de drenaje

Considerando la región noroeste de México (100°-117° W y 16°-33° N), la variabilidad interanual de precipitación fue alta en el periodo de estudio, registrándose la mayor intensidad durante 2004 en los estados de Jalisco, Nayarit, Sinaloa y sur de Sonora. Tanto la Península de Baja California como el norte de Sonora, presentaron las precipitaciones más bajas en el periodo. De 2005 a 2008 la precipitación más alta tuvo lugar en la zona marina al sur de Cabo Corrientes, Jalisco. (Fig. 2). De la precipitación anual integrada por latitud (cada 0.25°) en el cuadrante de estudio (incluyendo la zona marina), el año 2004 contribuyó con el 27% de la precipitación total de los cinco años, con máximos latitudinales entre los 28° y 29°, y entre los 19° y 20° (Fig. 3). Los años siguientes (2005-2008) contribuyeron con el 15, 18, 21 y 19%, respectivamente, presentando tendencias latitudinales similares con menor variación entre los 24° y 26°. Esta variabilidad interanual también es evidente al comparar los porcentajes de contribución por cuenca de drenaje a la precipitación total 2004-2008, en la que destacan los valores relativamente altos (>1.3%, línea discontinua en la Fig. 4a; este umbral corresponde al valor medio de precipitación en las cuencas del macizo continental en el periodo de estudio, y es utilizado únicamente como valor de referencia) en las cuencas de la región sudeste del GC en el año 2004. Considerando esta delimitación por cuencas de drenaje y la precipitación acumulada mensualmente para el 2004, se obtienen los periodos de mayor escorrentía potencial de julio a septiembre, en las cuencas de los Ríos Mayo, Yaqui, San Lorenzo, Culiacán, Fuerte, Sinaloa, Acajoneta y San Pedro (Fig. 4b). Esta distribución espacio-temporal permite ubicar las zonas de descarga, así como de periodos específicos para la búsqueda de plumas de material suspendido asociadas a los procesos de escorrentía.

La Figura 5 muestra las fluctuaciones del Índice Multivariado ENSO (MEI; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI>), así como los porcentajes mensuales de pre-

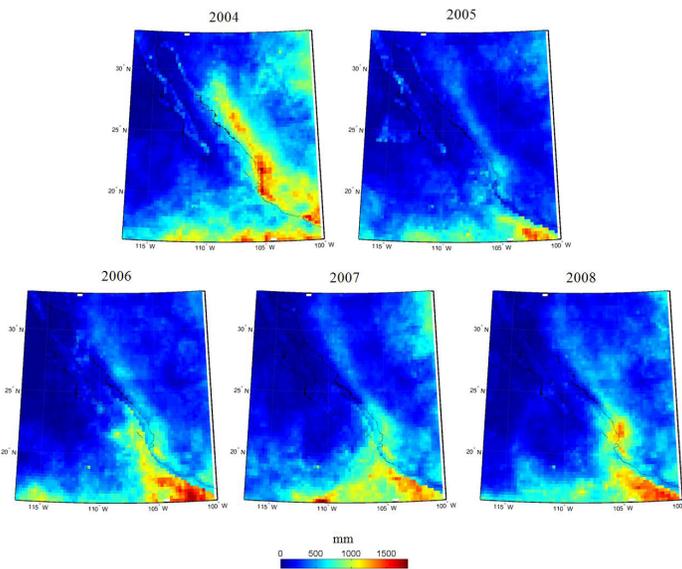


Figura 2. Distribución espacial de la precipitación acumulada anualmente (mm) 2004-2008. Mapas generados a partir de los datos del satélite TRMM (algoritmo 3B42 v6, NASA, 2007).

Figure 2. Spatial distribution of accumulated annual precipitation (mm) 2004-2008. Maps generated from TRMM satellite data (algorithm 3B42 v6, NASA, 2007).

precipitación en las cuencas que drenan al GC con respecto al total en los cinco años, y el acumulado anual de estos porcentajes. Los valores negativos del MEI representan la fase fría del ENSO (La Niña), mientras que los valores positivos representan la fase cálida (El Niño). Según este índice, en 2004 fue un año “El Niño” débil, y en el que se presentó la pre-

cipitación más intensa en el área y periodo de estudio (32%, relativo al total en los cinco años). Según la distribución espacial de la precipitación por cuencas se observa que, aunque 2006 también fue un año “El Niño” débil, éste sólo contribuyó con el 18% de la precipitación en las cuencas consideradas, en virtud de que gran parte de la lluvia registrada del 2005 al

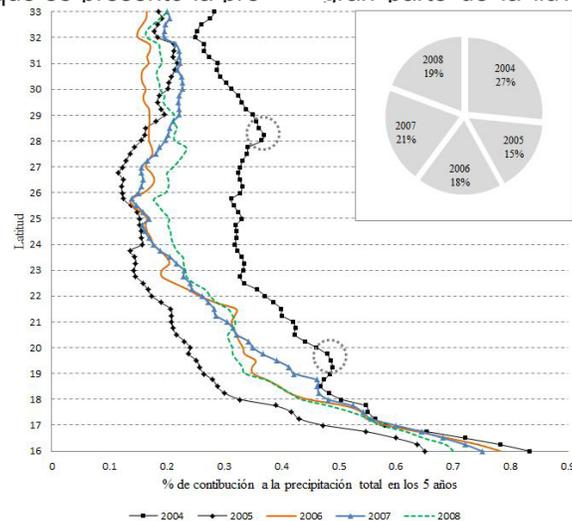


Figura 3. Porcentaje de la precipitación anual acumulada latitudinalmente (en intervalos de 0.25°) para la región noroeste de México (100-117° W y 16-33° N) incluyendo el área marina (cobertura representada en la Fig. 2). Los porcentajes se calcularon con respecto a la precipitación total en los cinco años (2004-2008). La gráfica circular integra los porcentajes latitudinales por año para obtener el porcentaje de precipitación anual.

Figure 3. Percentage of accumulated annual rainfall by latitude (0.25° intervals) for the northwest region of Mexico (100-117° W and 16-33° N) including the marine area (coverage depicted in Fig. 2). Percentages were calculated regarding to the total precipitation in five years (2004-2008). Pie graph integrates latitudinal percentages per year to obtain the annual precipitation.

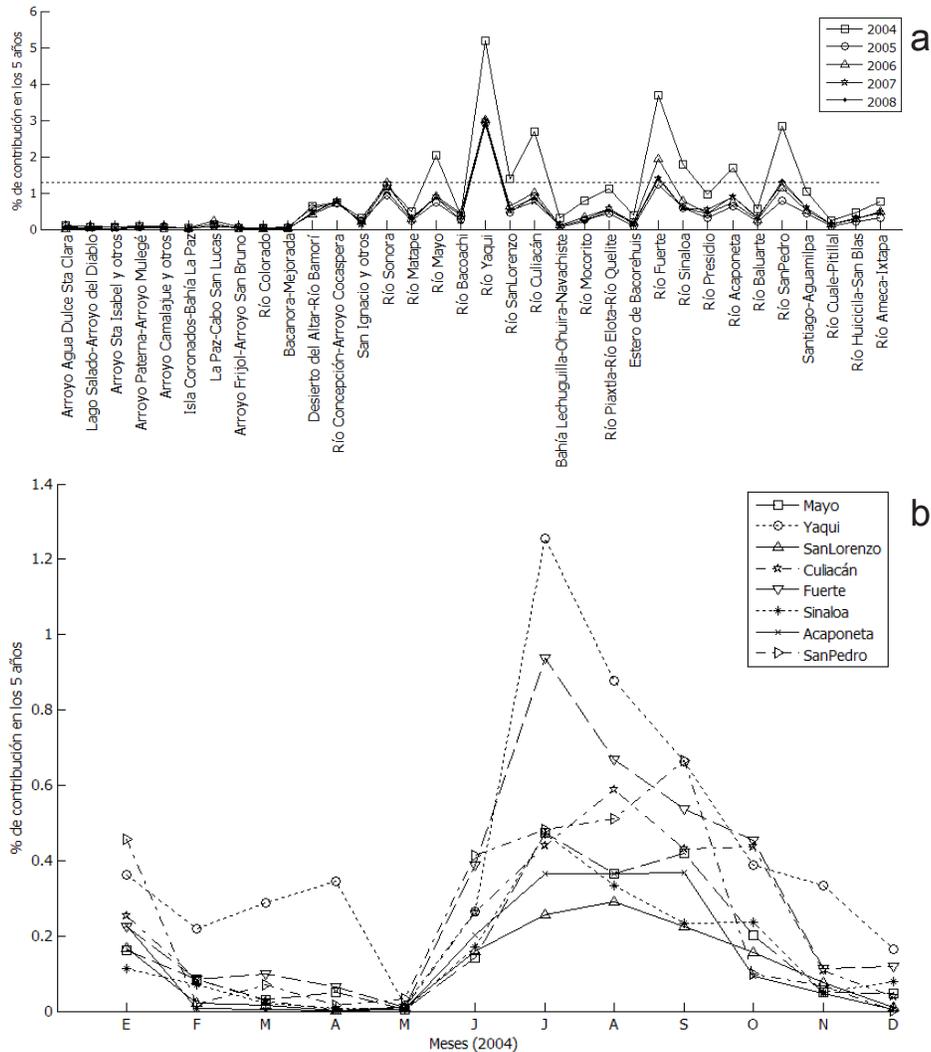


Figura 4. a) Porcentaje de precipitación anual por cuenca de drenaje para el periodo 2004-2008. La línea discontinua representa el umbral de 1.3% para seleccionar las cuencas con mayor precipitación. b) Precipitación acumulada mensualmente por cuenca de drenaje para el año 2004, para las cuencas con precipitación por arriba del umbral.

Figure 4. a) Annual precipitation percentage per drainage basin for 2004-2008. The dashed line represents the 1.3% threshold in order to select basins with major precipitation. b) Monthly accumulated precipitation per drainage basin in 2004, for basins with precipitation above threshold.

2008 se distribuyó en la zona marina (Fig. 2). Los años 2005 y 2008 tuvieron fase neutra, presentando porcentajes de contribución de 14 y 20% respectivamente. El porcentaje del 2008 resulta relativamente alto porque la zona de mayor precipitación abarca la región sur del área de estudio (Fig. 2). El 2007 fue un año “Niña” moderado, y su contribución a la precipitación fue del 16%.

Imágenes de MST

Las composiciones de color generadas a partir de los algoritmos aplicados a las imágenes MODIS permitieron detectar plumas de MST, así como estructuras relativamente

pequeñas (como filamentos de ~1.5 km de ancho y giros desde ~10 km de diámetro). La Figura 6 muestra cuatro escenas correspondientes a los días 02/AGO/04 (a), 18/AGO/04 (b), 14/SEP/08 (c) y 21/SEP/08 (d), en las que se observan plumas de material suspendido asociadas a las desembocaduras de algunos de los ríos principales (círculos azules), secundarios (círculos verdes) y canales de irrigación (líneas anaranjadas). Destaca una gran pluma en forma de hongo enfrente de las desembocaduras de los Ríos Acaponeta, San Pedro, Santiago y Ameca, que se extiende hasta aproximadamente ~290 km de la línea de costa de Nayarit (H y H', Fig. 6a y b);

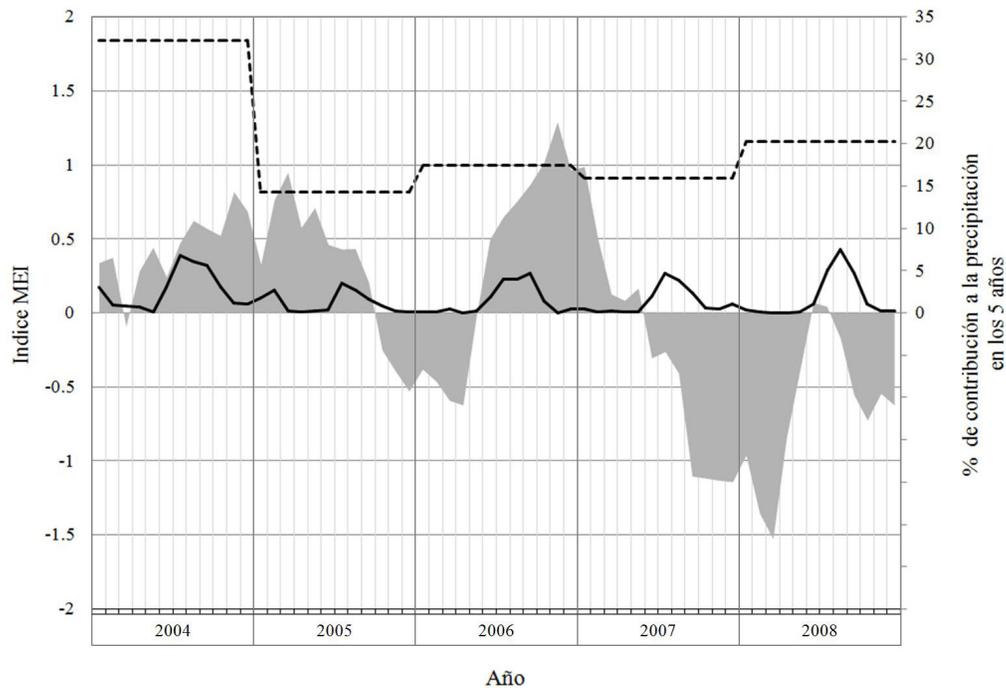


Figura 5. Índice Multivariado ENSO (MEI) (área gris). Los valores negativos del MEI representan la fase fría del ENSO (La Niña), mientras que los valores positivos representan su fase cálida (El Niño). La línea continua representa los porcentajes mensuales de precipitación en las cuencas que drenan al GC con respecto al total en los cinco años, y la línea discontinua el acumulado anual de estos porcentajes.

Figure 5. Multivariate ENSO Index (MEI) (grey area). Negative values of the MEI represent the cold ENSO phase (La Niña), while positive MEI values represent the warm ENSO phase (El Niño). The solid line represents monthly precipitation rates in basins draining into the GC, compared to the total in five years, and the dashed line represents the cumulative percentages per year.

la evolución de esta pluma se describe más adelante. En estas escenas también es posible inferir el transporte de material en los filamentos asociados a las desembocaduras de los Ríos Yaquí (y), Mayo (m), Fuerte (f), Sinaloa (s), Culiacán (c) y San Lorenzo (l), alcanzando generalmente distancias entre ~60 y ~100 km de la línea de costa continental con dirección predominante hacia el W o SW. Algunos de estos filamentos reflejan la influencia de giros en la distribución del material suspendido, como el anticiclónico que se hace evidente al este de la punta de la península, del que se separa un filamento hacia el oeste del giro (Fig. 6b). El patrón de distribución de MST desde la costa peninsular frente a Mulegé hacia el centro del golfo (Fig. 6), resulta consistente con la circulación ciclónica reportada para esta región por Fernández-Barajas *et al.* (1994). Es muy probable que el origen del material que llega a esta zona (límite norte del área de estudio) esté influenciado por la turbulencia generada en la región de las grandes islas, que a su vez contribuye a que en esta región se encuentren de manera persistente las mayores concentraciones de nutrientes en el GC (Álvarez-Borrego, 2008).

Imágenes de K490, clorofila y temperatura superficial

Con la finalidad de disminuir la cobertura de nubes en las imágenes con las que se dio seguimiento de la pluma en forma de hongo detectada en la región sur del GC, se utilizaron secuencias de imágenes promedio (de 8 días) de los parámetros: coeficiente K490, clorofila-*a* y temperatura superficial del mar (Fig. 7). Las imágenes comprenden del 19/JUN al 27/AGO de 2004; en general, la ubicación de esta pluma y otras de menor tamaño al Norte, se mantuvieron asociadas con temperaturas superficiales relativamente altas (~30 °C), cerca de la costa continental. En la secuencia se observa que la turbidez asociada a la estructura en forma de hongo, fue iniciada por dos plumas originadas en las desembocaduras al sur de Nayarit, con desplazamiento hacia el Oeste, una al norte de las Islas Marías (IM, su ubicación está representada con un pequeño rectángulo en las imágenes de la Figura 7) y otra al sur de las mismas. Siguiendo esta serie de escenas, en la primer imagen promedio (19-26/JUL, Fig. 7a), se pueden apreciar valores relativamente altos de turbidez (~0.4), de clorofila (5-30 mg m³), y de temperatura (~30 °C) cerca

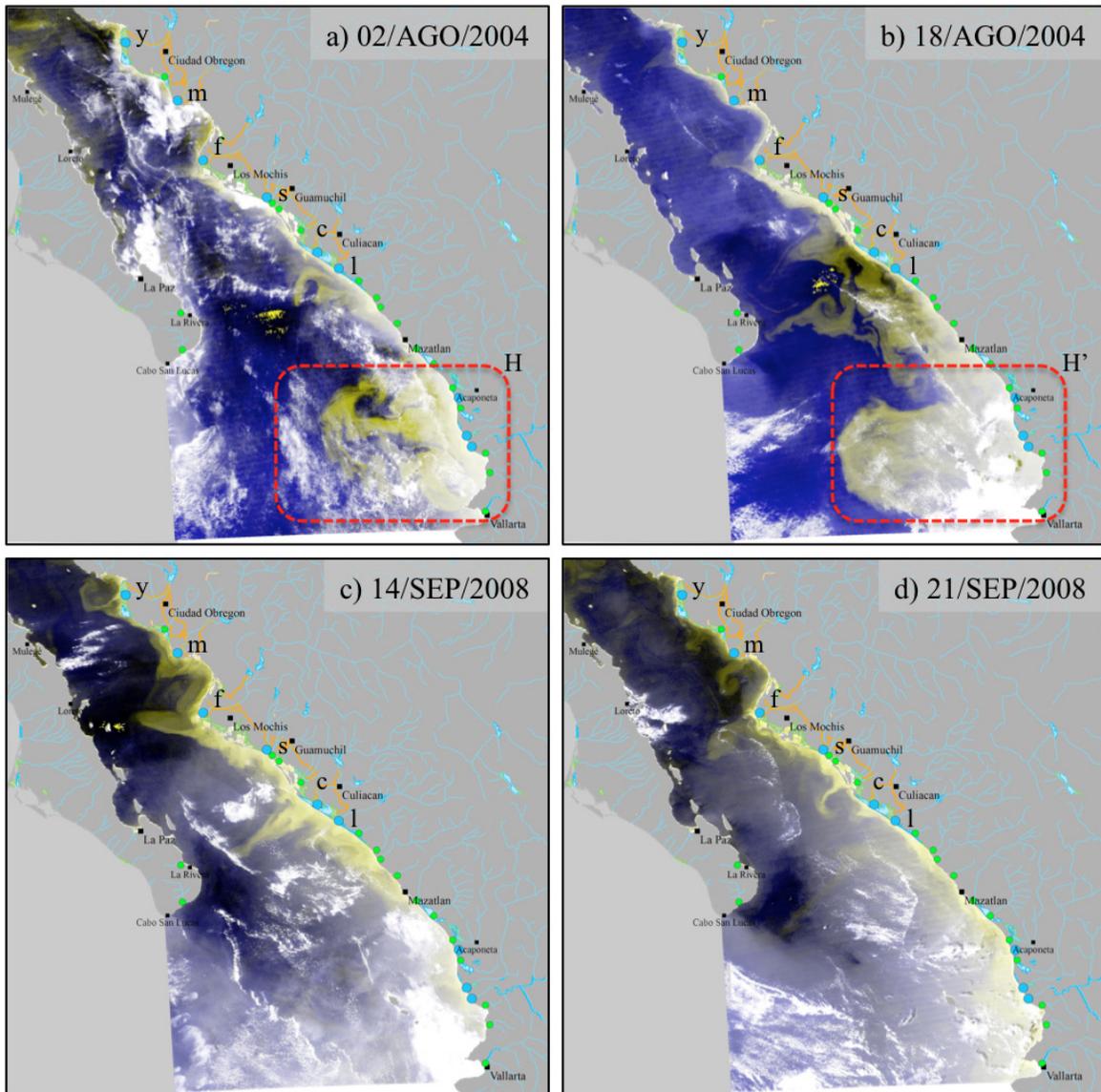


Figura 6. Distribución del índice de MST (tonos amarillos) generadas a partir de composiciones de color con los algoritmos de Tassan (1994), Miller y McKee (2004) y Ackerman *et al.* (1997). Se muestra la formación de una pluma en forma de hongo asociada a la descarga de los Ríos Acaponeta, San Pedro, Santiago y Ameca en agosto de 2004 (H, H'), así como plumas de MST desde las desembocaduras los Ríos Yaqui (y), Mayo (m), Fuerte (f), Sinaloa (s), Culiacán (c), y San Lorenzo (l).

Figure 6. MST index distribution (yellow tones) generated by using color compositions with the algorithms of Tassan (1994), Miller & McKee (2004) and Ackerman *et al.* (1997), showing the mushroom-like plume associated with Acaponeta, San Pedro, Santiago, and Ameca river discharges in August 2004 (H, H'), as well as MST plumes from the mouths of the Yaqui (y), Mayo (m), Fuerte (f), Sinaloa (s), Culiacán (c), and San Lorenzo (l) rivers.

de la desembocadura del Río San Pedro (rectángulo con línea discontinua). En la siguiente imagen (27/JUL-03/AGO, Fig. 7b) se observa la primera pluma desplazándose hacia el Oeste, al norte de las IM (b1), formando un frente en forma de hongo que se ubica a ~190 km de la costa de Nayarit. También se observa un filamento de turbidez y de alta concentración de clorofila al sudeste de las IM, aparentemente

influenciada por circulación ciclónica (b2). La temperatura superficial en un radio de ~90 km de las IM (b3) es más alta en relación con la imagen promedio anterior, sin embargo en esta secuencia no hay conexión aparente entre estas temperaturas superficiales altas y las aguas provenientes del Sur a través de la Corriente de Costera Mexicana (Beier *et al.*, 2003; Lavín *et al.*, 2006).

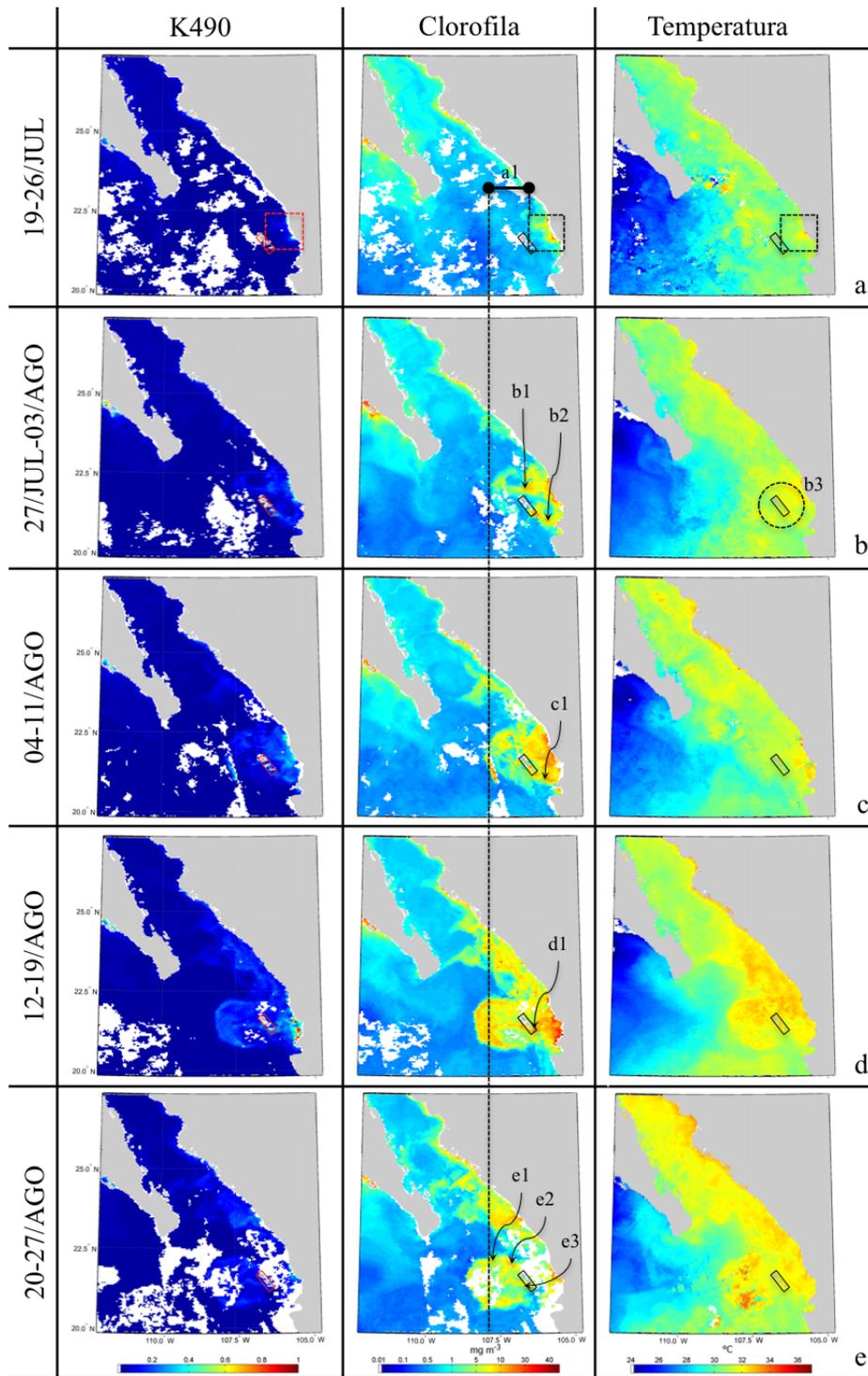


Figura 7. Secuencia de imágenes promedio de ocho días del coeficiente K490, clorofila-a y temperatura superficial del mar (MODIS-Aqua, obtenidos del sitio de la NASA). Se muestra la evolución de la pluma en forma de hongo al sudeste del área de estudio, asociada con altas temperaturas. El pequeño rectángulo indica la ubicación de las Islas Mariás.

Figure 7. Eighth days average image sequence of K490 coefficient, chlorophyll-a and sea surface temperature (MODIS-Aqua, obtained from the NASA site). It shows the evolution of the mushroom-like plume at the southeast of the study area, associated with high temperatures. The small rectangle indicates the location of the Mariás Islands.

Si consideramos la diferencia en distancia entre los frentes de las plumas y la línea de costa en estas dos primeras imágenes de clorofila (a1, ~130 km), y el tiempo transcurrido de 8 días, la velocidad media de transporte de la pluma sería del orden $\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$. En la tercera escena de la secuencia (04-11/AGO, Fig. 7c) las concentraciones de clorofila y la turbidez se incrementan cerca de la costa, extendiéndose hacia las IM; en esta escena el frente de la pluma no avanza más hacia el Oeste, y la segunda pluma se origina del filamento b2 (Fig. 7b), que se hace más evidente en la imagen del 04-11/AGO, alcanzando su mayor extensión en la escena del 12-19/AGO (Fig. 7d), con un chorro circulando hacia el Oeste, al sur de las IM y un frente que se acopla al de la primer estructura, avanzando a $\sim 290 \text{ km}$ de la costa. En esta imagen (Fig. 7d), el área oval asociada a la pluma en forma de hongo es de $\sim 40,000 \text{ km}^2$. En la última imagen de la secuencia (20-27/AGO, Fig. 7e) el frente avanza $\sim 10 \text{ km}$ más hacia el Oeste, hasta una distancia a la línea de costa de $\sim 300 \text{ km}$. La turbidez y la concentración de clorofila decaen en la pluma circular, lo que permite observar con mayor contraste los remanentes de los chorros (e2 y e3) y el frente de la pluma (e1) en la imagen de clorofila (Fig. 7e y Fig. 8a).

DISCUSIÓN

El escurrimiento superficial en las cuencas que drenan al este del GC, es disminuido por la captación en la infraestructura hidráulica construida (10 presas con una capacidad de almacenaje individual superior a los 2 mil millones de m^3 y una superficie total de $48,000 \text{ km}^2$ (CNA, 2004)). No obstante, esta escorrentía puede tener efectos significativos en las propiedades ópticas del GC, como resultado del aporte de material orgánico e inorgánico suspendido, así como de los procesos biológicos estimulados por este flujo. En época de lluvias intensas, el escurrimiento de agua superficial aporta nutrientes desde las zonas agrícolas localizadas a lo largo de la costa este del GC. Beman *et al.* (2005) concluyen que las escorrentías del Valle del Río Yaqui provocan florecimientos de fitoplancton (de 54 a 577 km^2) en el GC, ejerciendo una fuerte y consistente influencia en los procesos biológicos. Esto como consecuencia de la aplicación de cantidades extremadamente altas de fertilizantes (250 kg N ha^{-1} en $2.25 \times 10^5 \text{ ha}$, en el Valle del Yaqui). Según estos autores, la escorrentía superficial es determinada principalmente por irrigación de las zonas agrícolas, causando descargas de grandes pulsos de N hacia aguas superficiales. La distribución de las plumas de MST mostradas en el presente trabajo, y el efecto de los fertilizantes en esta

región sugerido por Beman *et al.* (2005), apuntan a que el escurrimiento superficial podría estar aportando gran cantidad de nutrientes al GC de manera esporádica durante las épocas de mayor precipitación, estimulando florecimientos asociados a las zonas de turbidez alineadas a las desembocaduras de los principales ríos (Fig. 6). En un estudio a escala global, Boyce *et al.* (2010) concluyen que la concentración de fitoplancton ha disminuido en el último siglo a una tasa del 1% de la media anual por año, como consecuencia del aumento en la temperatura del mar, y que esta tendencia se observa en la mayoría de los océanos, con excepción de algunas zonas costeras del Océano Índico, señalando que el aporte de fertilizantes por escorrentía desde las zonas agrícolas tienen un efecto importante al incrementar el aporte de nutrientes, y por ende la concentración de fitoplancton. Las altas temperaturas asociadas con algunas plumas en nuestra área de estudio permiten, por una parte, descartar las surgencias como mecanismo que favorezca altas concentraciones, y por otra, enfatizar la importancia de las descargas desde zonas agrícolas al igual que en las regiones costeras del Océano Índico. Cabe señalar que en algunas imágenes correspondientes a periodos sin precipitación, se observaron zonas de turbidez restringidas a franjas relativamente estrechas (a menos de 10 km del litoral continental del área de estudio). La plataforma de la costa este del GC es extensa, y en su región más somera los procesos dominantes en la generación de MST son la resuspensión de sedimentos y mezcla vertical. La distribución espacial de la turbidez provocada por estos procesos es limitada (en comparación con la influenciada por escorrentía), puesto que se origina en zonas muy someras ($\sim 15 \text{ m}$; Lavín *et al.*, 1997) y el material se vuelve a sedimentar antes de ser desplazado grandes distancias.

Si consideramos el escenario de agosto de 2004 para la boca del GC, con el patrón de circulación superficial estacional caracterizado por un flujo ingresando por su margen este, donde la distribución de salinidad es baja con respecto a la costa peninsular (Roden, 1964) y viento del sudeste (de $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ según datos QuikSCAT del 22 de agosto de 2004, Fig. 8a), se podría inferir un flujo de MST hacia el NW paralelo a la costa continental. Sin embargo, en algunas de las imágenes MODIS procesadas para esa época en este trabajo, se observa un transporte casi perpendicular al eje mayor del golfo; plumas de material suspendido que lo cruzan de este a oeste (Fig. 8a). Una de las plumas de MST captada en la imagen del 21/AGO/2004 coincide en espacio y tiempo con la trayectoria de una boya de deriva que registró

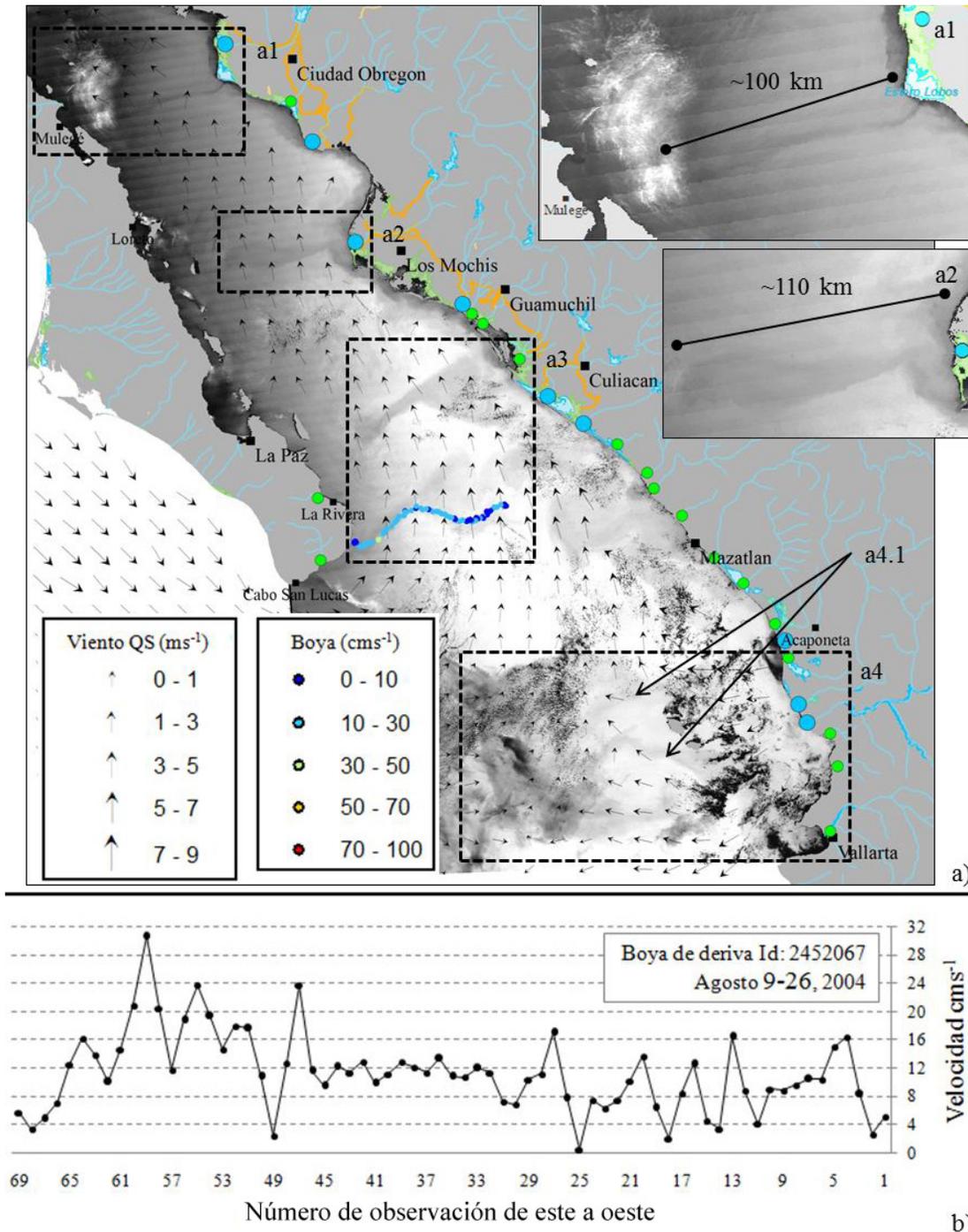


Figura 8. a) Imagen de la distribución relativa de MST del 21/AGO/04; vectores de viento QuikSCAT del 22/AGO/04 y trayectoria de boya de deriva del 9-26/AGO/04 (línea azul con dirección hacia la punta de la península). Se muestran acercamientos a una pluma saliendo del Estero Lobos, cercano a la desembocadura del Río Yaquí (a1), y otra de la desembocadura del Río Fuerte (a2). b) Fluctuaciones en la velocidad de la boya de deriva conforme se desplaza de E a W; el eje de las abscisas representa la secuencia de observaciones (69) en intervalos de ~6 h.

Figure 8. a) Relative MST distribution image on AUG/21/04; QuikSCAT wind vectors on AUG/22/04 and drifting buoy track record from 9-26/AGO/04 (blue line with direction towards the tip of the peninsula). It shows zooms to a plume coming out from Estero Lobos, near Yaquí River mouth (a1), and another one from the Fuerte River mouth (a2). (b) Drifting buoy speed fluctuations as it moves from E to W; the abscissa axis represents the observation sequence (69) at intervals of ~6 h.

la corriente superficial en la entrada del golfo del 9 al 26 de agosto de ese año (Fig. 8a). El recorrido de la boya (~160 km), delinea la extensión y contorno de la pluma a una velocidad media de 11.3 cm s^{-1} y máxima de 30.6 cm s^{-1} (las fluctuaciones de velocidad se muestran en la Fig. 8b). Así, el tiempo de transporte de material suspendido desde la primera ubicación de la boya hasta la punta de la península sería por lo menos del orden de ~16 días (considerando la velocidad media de la boya, y que esta se desplaza con mayor velocidad que la pluma por el efecto de la superficie del elemento de arrastre). Durante este tiempo, el material particulado más grueso se habrá hundido relativamente cerca de la costa, hasta quedar fuera del alcance del sensor del satélite (~37% de la zona eufótica (Gordon & McCluney, 1975)), mientras que la tasa de sedimentación del material fino ($\ll 1 \text{ m d}^{-1}$ (Lal, 1977)) permite que éste sea visible por el sensor durante varios días. Esta diferencia en las tasas de sedimentación y el hecho de que el flujo de la escorrentía no es constante (sino en pulsos), puede producir el efecto de que la pluma se separa de la desembocadura que le dio origen (Fig. 8a, a3). Así, el material fino puede ser transportado durante varios días a una profundidad a la que es detectado por sensores remotos, lo que permite usarlo como trazador de la compleja circulación superficial de esta zona. En cuanto a esta circulación, trabajos como los de Fernández-Barajas *et al.* (1994), Emilsson y Alatorre (1997), Amador-Buenrostro *et al.* (2003) y Figueroa *et al.* (2003), han documentado giros ciclónicos y anticiclónicos en el sur del GC. Figueroa *et al.* (2003) señalan que estos giros no tienen un sentido de rotación preferente, ni aparecen con mayor frecuencia en alguna estación del año. Según estos autores, tampoco parecen estar asociados con rasgos batimétricos, puesto que pueden encontrarse confinados a una cuenca, o sobre los umbrales que separan las cuencas Pescadero-Farallón, Farallón-Carmen y Carmen-Guaymas. Con tal distribución, estas estructuras tienen una gran influencia en la distribución de material suspendido. En el caso particular de las plumas mostradas en la imagen del 21/AGO/2004, éstas no presentan deformaciones aparentes por vorticidad, su orientación es prácticamente en línea recta (Fig. 8a, a1, a2, a3) hacia el oeste o sudoeste, alcanzando distancias del orden de ~100 km con respecto a la costa continental. Es muy probable que esta orientación de las plumas sea originada por los giros de mesoescala documentados en esta zona. Por ejemplo, el giro ciclónico al norte de la Cuenca Guaymas y su contraparte anticiclónica al sur de la misma, en conjunto provocan una corriente hacia

el oeste, justo en la zona de la desembocadura del Río Yaqui. En las imágenes SeaWiFS del 31 de agosto al 4 de septiembre de 1999 presentadas por Pegau *et al.* (2002), la distribución de clorofila se extiende desde las zonas cercanas a las desembocaduras de los Ríos Yaqui y Fuerte hacia el centro del GC, como resultado de la influencia de estos grandes giros.

La pluma en forma de hongo ubicada al sur del área de estudio, fue una de las más conspicuas encontradas en este trabajo. Su formación se origina en una zona en la que confluyen diversas masas de agua, principalmente las subárticas, transportadas por la Corriente de California (CC), así como las tropicales, transportadas por la Corriente Costera Mexicana (CCM) (Lavín *et al.*, 2006). El frente frío de la CC, parece confinar la pluma en un área oval de agua superficial cálida que se mantiene con pocos cambios en su cobertura espacial durante varios días (Fig. 7b-e). La distribución espacial del agua superficial cálida sugiere que esta zona es influenciada localmente por los procesos de escorrentía, lo que contribuye a establecer un gradiente de densidad más pronunciado con respecto a las aguas aledañas al W (Fig. 7d). Esto concuerda con lo reportado por Palacios-Hernández *et al.* (2010), quienes encuentran una correlación alta ($r > 0.70$) entre la temperatura superficial del mar en esta zona y la precipitación en Nayarit, con un retraso de un mes (un mes después de las lluvias la temperatura superficial se incrementa). En el 2004 las lluvias intensas iniciaron en julio (Fig. 4), lo que podría explicar que el incremento en la temperatura superficial del mar cercana a la costa continental, se reflejara en el mes de agosto (Fig. 7). Por su forma y dimensión (~40,000 km², extendiéndose a ~300 km de la línea de costa), el origen de esta pluma podría estar relacionada con los procesos descritos por Fedorov y Ginsburg (1989), quienes explican que la formación de corrientes dipolo (en forma de hongo) en zonas costeras pueden estar asociadas a descargas de ríos, forzamiento por vientos locales concentrados por la geometría de la costa o por la topografía, así como por la interacción de giros. En este sentido, Zamudio *et al.* (2007) demuestran (utilizando datos de altimetría satelital y el modelo oceánico en capas NLOM (Navy Layered Ocean Model)) la formación de giros anticiclónicos en la región de las Islas Marías y Cabo Corrientes, cuya formación varía anualmente, intensificándose durante eventos "El Niño". Estos autores concluyen que los factores esenciales para la formación de estos giros son la configuración de la costa, y las ondas atrapadas a la costa, generadas en el Pacífico Ecuatorial. Godínez *et al.* (2010)

también muestran la formación de una serie de giros en la entrada del GC, utilizando datos hidrográficos y de altimetría satelital, con los que calculan la corriente geostrófica superficial y concluyen que los giros pueden tener un papel importante en el transporte de propiedades desde la costa hacia aguas profundas. Lavín *et al.* (2009) describen a partir de imágenes de temperatura superficial del mar del 13/MAY-16/JUN/04, la formación de una estructura dipolo asociada a la advección de agua de la CC a través de la entrada del GC, en dirección casi normal a su eje. Al final de esta intrusión, al sur de la costa de Sinaloa, se desarrolla una estructura en forma de hongo, con giro ciclónico al Norte y uno anticiclónico al Sur (Fig. 3 de Lavín *et al.* (2009)). En las imágenes mostradas en el presente trabajo (Fig. 6) (captadas un mes después de las descritas por Lavín *et al.* (2009)), la estructura de vórtice dipolar parece formarse como resultado de la interacción de los giros descritos por estos autores en la zona de Cabo Corrientes e Islas Mariás. La intensificación de este tipo de circulación, así como del aporte de MST por escorrentía durante eventos "El Niño", propician una mayor propagación de las plumas, lo que hace más probable su detección utilizando imágenes de color del mar.

Trabajos como los de Pegau *et al.* (1999) y Cervantes-Duarte *et al.* (2000) abordaron la caracterización de las propiedades ópticas en el GC utilizando datos obtenidos con radiómetros ambientales en tres cruceros oceanográficos en 1995, 1997 y 1998. Aunque es difícil obtener una generalización para una zona tan dinámica como lo es la boca del golfo, Cervantes-Duarte *et al.* (2000), proponen familias de ecuaciones de regresión lineal que relacionan el coeficiente de atenuación difusa K490, con las profundidades de atenuación de luz al 10, 3, 1, y 0.1% de la que incide en la superficie. Con la obtención de información de turbidez *in situ* de buena resolución espacial y temporal, sería posible correlacionar K490 medido con sensores remotos con la concentración del MST en una etapa de calibración, para después obtener estas concentraciones de manera operacional.

La pluma más conspicua detectada en este trabajo (con un área de ~44,000 km² y su frente ubicado a ~300 km de la línea de costa de Nayarit), se origina en la zona de las desembocaduras de los Ríos Acaponeta, San Pedro, Santiago y Ameca, durante agosto de 2004. Por el seguimiento de su extensión y forma, se infiere que su evolución está determinada por los siguientes factores: 1) La presencia de material suspendido y nutrientes aportados por la escorrentía de los ríos mencionados; 2) La relación entre la precipitación de los meses de verano con el incremento en la temperatura su-

perficial del mar (descrita por Palacios-Hernández *et al.* 2010), y su efecto combinado con la escorrentía en la disminución de la densidad de la capa superficial del mar (Roden, 1972); 3) El efecto de la circulación anticiclónica en la zona costera al norte de las desembocaduras mencionadas, provocada por la advección de agua de la CC hacia la costa de Sinaloa; 4) El efecto de la circulación ciclónica al sur de las IM por el efecto de la CCM desplazándose hacia el oeste. La intensificación de los giros (Zamudio *et al.*, 2007), en coincidencia con precipitación intensa en esta zona durante eventos "El Niño", hace más probable la formación de este tipo de plumas, y su detección con imágenes de color del mar.

El procesamiento de los datos de precipitación pluvial (del satélite TRMM) por cuencas de drenaje fue apropiado para acotar la búsqueda de escenas MODIS en periodos y regiones específicos (ubicación de las descargas en términos espaciales y temporales). Sin embargo, en virtud de que uno de los procesos de interés en este trabajo, la escorrentía, está asociado con las épocas de mayor nubosidad, la cobertura de nubes fue una limitante para obtener secuencias más detalladas de la evolución de las plumas, por lo que es recomendable incluir en futuros trabajos el tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética como complemento de las imágenes de color.

Los tres algoritmos aplicados a imágenes MODIS para generar composiciones de color (Fig. 6 y 8), realzaron la cobertura de MST asociada a las desembocaduras de los principales ríos del margen continental del GC durante las épocas de mayor escorrentía (verano de 2004 y de 2008), ofreciendo la posibilidad de inferir algunos mecanismos de transporte por estructuras de mesoescala. Es necesario obtener concentraciones de MST con muestreos *in situ* de alta resolución espacial y temporal, con la finalidad de calibrar los algoritmos aplicados a los datos de sensores remotos, y generar mapas de la distribución de concentraciones absolutas de MST de manera operacional. También se recomienda desarrollar algoritmos para inferir la velocidad de transporte de MST, con métodos de reconocimiento de patrones en sub-escenas de imágenes secuenciales (Matthews & Emery, 2009). Éstos permiten estimar los campos de velocidad superficial a partir del seguimiento de la dispersión de un trazador en un fluido. Con la identificación del MST, la siguiente etapa consiste en utilizarlo como trazador del transporte advectivo, en secuencias de imágenes obtenidas en intervalos cortos (~24 h).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento para el desarrollo de este trabajo a los proyectos: "Evaluación de los procesos y controles de cambio de la línea de costa del Golfo de California" (CONACYT-25274) y "Vulnerabilidad geológica-ambiental de la zona costera del Golfo de California" (SIP-IPN 20082825), así como a las agencias que facilitaron los datos: La Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional del Agua (CNA), Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA), Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), Equipo de Vectores de Viento sobre el Océano (OVWST), Programa Global de Boyas de deriva (GDP), Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Asimismo, nuestro agradecimiento a los revisores, quienes anónimamente contribuyeron a mejorar este documento.

REFERENCIAS

- Acker, J., Ouillon, S., Gould, R. & Arnone, R. 2005. Measuring Marine Suspended Sediment Concentrations from Space: History and Potential. International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Halifax, NS, Canada.
- Ackerman, S., K. Strabala, P. Menzel, R. Frey, C. Moeller, L. Gumley, B. Baum, C. Schaaf & G. Riggs. 1997. Discriminating Clear-Sky from Cloud with MODIS: Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35). Algorithm Theoretical Basis Document AT-BD-MOD-06, NASA Goddard Space Flight Center, 125 p.
- Álvarez-Borrego, S. 2008. Oceanografía de la región de las grandes islas. 45-65. En: G. Danemann & E. Ezcurra (Eds.). *Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea base 2007*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-968-817-891-1.
- Amador-Buenrostro, A., Trasviña-Castro, A., Muhlia-Melo, A. F. & Argote-Espinoza, M. L. 2003. Influence of EBES seamount and Farallon basin on coastal circulation in the Gulf of California, Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3):407-418.
- Arias-Patrón, E. 2005. Plan de acción para el uso eficiente de agua dulce en el Golfo de California. Reporte técnico final para WWF. Sonora, México. 64 p.
- Beier, E., M. F. Lavín, J. Gómez, V. Godínez & J. García. 2003. La Corriente Costera Mexicana. GEOS, Reunión Anual 2003 de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, México, 23:152.
- Beman, J. M., K. R. Arrigo, & P. A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature*, 434(7030):211-214. <https://doi.org/10.1038/nature03370>
- Boyce, D. G., Lewis M. R., Worm, B. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466(7306):591-596. <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Cervantes-Duarte, R., J. L. Mueller, C. C. Trees, H. Maske, S. Alvarez Borrego & J. R. Lara Lara. 2000. Euphotic depth, irradiance, attenuation, and remote sensing K490 in bio-optical provinces of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 26(4):533-560. <https://doi.org/10.7773/cm.v26i4.622>
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio Ed. Ariel Ciencia. Barcelona, España. 447 p.
- CNA. 1998. Cuencas Hidrológicas de México. Comisión Nacional del Agua. Cartografía escala 1:250000. México.
- CNA. 2004. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua, México.
- Del Castillo, C. E., F. Gilbes, P. G. Coble & F. E. Muller-Karger. 2000. On the Dispersal of Riverine Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) over the West Florida Shelf. *Limnology and Oceanography*, 45(6):1425-1432. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1425>
- Emilsson, I. & M. A. Alatorre. 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California, 173-182. En: Lavín, M. F. (Ed.) *Contribuciones a la oceanografía física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Monografía 3.
- Fedorov, K. N. & Ginsburg, A. I. 1989. Mushroom-Like Currents (Vortex Dipoles): One of the Most Widespread Forms of Non-Stationary Coherent Motions in the Ocean. 1-14. En: J.C.J. Nihoul & B.M. Jamart (Eds.) *Mesoscale/Synoptic Coherent structures in Geophysical Turbulence. Elsevier Oceanography Series*, Elsevier, Volume 50, 841 p. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70173-9](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70173-9)

- Figueroa, M., S. G. Marinone & M. Lavín. 2003. Geostrophic gyres of the Gulf of California, 237-255. En O. U. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum & J. L. Ochoa de la Torre (Eds.) *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 376 p.
https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_14
- Fernández-Barajas, M. E., M. A. Monreal, & A. Molina-Cruz. 1994. Thermohaline Structure and Geostrophic Flow in the Gulf of California, during 1992. *Ciencias Marinas*, 20:267-286.
<https://doi.org/10.7773/cm.v20i2.958>
- Folland, C. K., D. E. Parker, A. W. Colman & R. Washington. 1999. Large scale modes of ocean surface temperature since the Late Nineteenth century, 73-102. En: Navarra, A. (Ed.) *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*, Springer-Verlag press, Berlin, Alemania, 374 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-58369-8_4
- Godínez, V. M., E. Beier, M. F. Lavín & J. A. Kurczyn. 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations, *J. Geophys. Res.*, 115, C04007, <https://doi.org/10.1029/2009JC005705>
- Gordon, H. R. & W. R. McCluney. 1975. Estimation of the Depth of Sunlight Penetration in the Sea for Remote Sensing, *Appl. Opt.* 14: 413-416.
<https://doi.org/10.1364/AO.14.000413>
- Hu, C., E. T. Montgomery, R. W. Schmitt & F. E. Muller-Karger. 2004. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(10-11):1151-1171.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(04\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(04)00105-5)
- Lal, D. 1977. The Oceanic Microcosm of Particles. *Science*, 198:997-1009.
<https://doi.org/10.1126/science.198.4321.997>
- Lavín, M. F., E. Beier & A. Badan. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Unión Geofísica Mexicana, Monogr. No. 3:141-171.
- Lavín, M. F., E. Beier, J. Gómez-Valdés, V. M. Godínez, & J. García. 2006. On the summer poleward coastal current off SW México, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02601, <https://doi.org/10.1029/2005GL024686>
- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, V. M. Godínez, A. Amador, & P. Guest. 2009. SST, thermohaline structure, and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon Experiment, *J. Geophys. Res.*, 114, C02025.
<https://doi.org/10.1029/2008JC004896>
- Lluch-Cota S. E., E. A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriolos-Gamboa, J. J. Bautista-Romero, R. C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, A. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M. E. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D. B. Lluch-Cota, J. López-Martínez, S. G. Marinone, M. O. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Parés-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, C. A. Salinas-Zavala, R. A. Schwartzlose & A. P. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73(1):1-26.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.01.013>
- Lohrenz, S. E., Dagg, M.J. & Whitledge, T. E. 1990. Enhanced primary production at the plume/oceanic interface of the Mississippi River. *Continental Shelf Research*, 10:639-664.
[https://doi.org/10.1016/0278-4343\(90\)90043-L](https://doi.org/10.1016/0278-4343(90)90043-L)
- Marinone, S. G. 2003. A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 108(C10): 3325.
<https://doi.org/10.1029/2002JC001720>
- Marinone, S. G, M. J. Ulloa, A. Parés-Sierra, M. F. Lavín & R. Cudney-Bueno. 2008. Connectivity in the northern Gulf of California from particle tracking in a three-dimensional numerical model, *Journal of Marine Systems*, 71:149-158.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.06.005>
- Martínez, R. E. 2006. *Manifestación de El Niño 1997-98 en los Campos de Temperatura y Salinidad en la costa del Pacífico Central Mexicano*. Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- Maske H., S. 2001. Derrames pluviales costeros en el Golfo de California y su posible detección mediante imágenes de color del océano (SeaWIFS), 165-171. En: Escobar, E., M. Bonilla, A. Badán, M. Caballero & A. Winckell (Eds.) *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*, CONACYT, México. 246 p.

- Matthews, D. K. & W. J. Emery. 2009. Velocity observations of the California Current derived from satellite imagery. *J. Geophys. Res.*, 114, C08001, <https://doi.org/10.1029/2008JC005029>
- Miller, R. L. & B. A. McKee. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 93:259-266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>
- Morel, A. & L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22: 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Mueller, J. L. 2000. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, K (490), using water-leaving radiances at 490 and 555 nm, 24-27. En: Hooker, S. B. & Firestone, E. R. (Eds.) *Volume 11, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3*, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 49 p.
- Muller-Karger, F. E., C. R. McClain, T. R. Fisher, W. E. Esaias & R. Varela. 1989. Pigment distribution in the Caribbean Sea: observations from the space. *Progress in Oceanography*, 23:23-69. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(89\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0079-6611(89)90024-4)
- Muller-Karger, F. E. & R. Varela. 1990. Influjo del río Orinoco en el mar Caribe: Observaciones con el CZCS desde el espacio, *Mem. Soc. Cien. Nat.*, La Salle, 131-134:365-384.
- Muller-Karger, F. E., P. L. Richardson & D. McGillicuddy. 1995. On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic, *Deep-Sea Research I*, 42(11/12):2127-2137. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00085-2](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00085-2)
- NASA. 2007. Tropical Rainfall Measuring Mission Science Data and Information System: Interface Control Specification between the Tropical Rainfall Measuring Mission Science Data and Information System (TSDIS) and the TSDIS Science User (TSU). NASA GSFC Doc. TSDIS-P907, Vol. 4, Release 6.09.
- Ogden, J. C. 1997. Marine managers look upstream for connections, *Science*, 278:1414-1415. <https://doi.org/10.1126/science.278.5342.1414>
- Palacios-Hernández, Emilio, Laura E. Carrillo, Anatoliy Filonov, Luis Brito-Castillo & Carlos E. Cabrera-Ramos. 2010. Seasonality and anomalies of sea surface temperature off the coast of Nayarit, Mexico, *Ocean Dyn.*, 60(1):81-91. <https://doi.org/10.1007/s10236-009-0244-z>
- Pegau, W. S., Zaneveld, J. R. V., Bernard, A. H., Maske, H., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, R., & Cervantes-Duarte, R. 1999. Inherent optical properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(4):469-485. <https://doi.org/10.7773/cm.v25i4.731>
- Pegau W.S., E. Boss & A. Martinez. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California, *Geophys. Res. Lett.*, 29. <https://doi.org/10.1029/2001GL014076>
- Ritchie, J. C. & Cooper C. M. 2001. Remote sensing of water quality: Application to TMDL. TMDL Science Issues Conference. Water Environment Federation, Alexandria, VA. 367-375.
- Ritter, N. & Ruth, M. 1995. GeoTIFF Format Specification Rev. 1.0, GeoTIFF Working Group, 95 p.
- Ritter, N. & Ruth, M. 1997. The GeoTiff data interchange standard for raster geographic images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(7): 1637-1647. <https://doi.org/10.1080/014311697218340>
- Roberts, C. M. 1997. Connectivity and management of Caribbean coral reefs, *Science*, 278:1454-1457. <https://doi.org/10.1126/science.278.5342.1454>
- Roden, G. I. 1964. Oceanographic aspects of Gulf of California, 30-54. En: Van Andel, T. H. & G. G. Shor Jr. (Eds.) *Marine Geology of the Gulf Of California: A symposium*, Scripps Institution of Oceanography, University of California, Am. Assoc. Pet. Geol., Mem. 3.
- Roden, G. I. 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Islands region. *J. Phys. Oceanogr.* 2(2):177-183. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1972\)002<0177:TSABFA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1972)002<0177:TSABFA>2.0.CO;2)
- Schlüssel, P. 1996. Remote sensing of parameters relevant to the particle flux in the ocean using meteorological satellites, 1739-1756. En: V. Ittekkot, P. Schäfer, S. Honjo and P. J. Depetris (Eds.) *Particle Flux in the Ocean*, SCOPE Report 57, John Wiley & Sons, Chichester, 7-17.
- Tamayo, J. L., 1965. Informe sobre la hidrología de México y Centroamérica, UNESCO/CASTALA/2.1.2/IV.2, CS/0665.50/APS.16 (WS), Santiago de Chile, 89 p.
- Tassan, S. 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters, *Appl. Opt.*, 33:2369-2378. <https://doi.org/10.1364/AO.33.002369>

- Trenberth, K. E. 1997. The Definition of El Niño, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 78:2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Turrent, T. C. 2009. Estudio numérico del contraste térmico océano-continente asociado al inicio del Monzón de América del Norte. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, 100 p.
- Yang, W. 2006. A review of Remote Sensing Data Formats for Earth System Observations, 120-145. En: *Earth Science Satellite Remote Sensing*, Qu, Gao, Kafatos, Murphy and Solomonson (Eds.), Springer and Tsinghua University Press, Vol. 2. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37294-3_7
- Zamudio, L., H. E. Hurlburt, E. J. Metzger, & C. E. Tilburg. 2007. Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the María Islands, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 112, C05048. <https://doi.org/10.1029/2006JC004018>

Copyright (c) 2011 Martínez Flores, G., E.H. Nava Sánchez & O. Zaitzev.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de la licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)