

19 TELEDETECCIÓN DEL IMPACTO DEL HURACÁN IGNACIO (2003) EN EL PACÍFICO TROPICAL ORIENTAL

*C. Fuentes-Yaco, J.E. Valdez-Holguín, E. Devred,
T. Platt, S. Sathyendranath, J. Halfar, L. Godinez-Orta
y J.M. Borges*

INTRODUCCIÓN

La palabra Huracán se menciona desde el capítulo primero del Popol Vuh (el libro sagrado de los Mayas de México y Guatemala) como el primer miembro del Corazón del Cielo o la Triada Celeste; Caculhá-Huracán (Huracán una pierna) es el dios de las tormentas, el relámpago y el fuego, presente durante la creación del mundo. Actualmente, huracán en Norte y Centroamérica, ciclón en el Pacífico Oriental, la India y el Golfo de Bengala, tifón en el Pacífico Occidental, Willy-Willy en Australia y baguio en Filipinas, son términos genéricos que se refieren a cualquier sistema atmosférico no frontal de origen tropical o subtropical con una convección bien organizada y circulación de vientos ciclónica superficial y bien definida. La región más activa de huracanes en el mundo es el noroeste del Océano Pacífico; sin embargo, las regiones oriental del Pacífico Tropical y noroccidental del Atlántico también presentan estos fenómenos meteorológicos. El Océano Pacífico Nororiental es una región donde la actividad de tormentas tropicales y huracanes es mayor entre junio y noviembre (Alvarez-Borrego 1983). Generalmente los huracanes se dirigen hacia aguas abiertas del Pacífico, pero algunos de ellos ingresan al Golfo de California (Zehnder y Gall 1991), causando severos daños en las regiones costeras, principalmente en la parte sur de la Península de Baja California.

La oceanografía se ha beneficiado ampliamente de los sensores remotos para estudiar las propiedades del agua desde una perspectiva sinóptica. Por esa razón, el uso de sensores a bordo de satélites para medir los campos sinópticos del color y la temperatura superficiales del mar han aumentado nuestra capacidad en el estudio del impacto de los huracanes en la capas superficiales del océano (Platt *et al.* 2005). Estos eventos aumentan el transporte de agua fría de las capas profundas, rica en nutrientes, hacia la capa de mezcla, e incrementan la intensidad de la producción primaria y la biomasa de fitoplancton (clorofila *a*) (Fuentes-Yaco *et al.* 2005).

En este estudio se utilizaron imágenes satelitales y datos registrados *in situ* para examinar la respuesta de los campos de clorofila y temperatura al paso del Huracán Ignacio. La investigación se distingue porque los datos satelitales coinciden con el registro *in situ* de algunas propiedades físicas y biológicas del mar al paso de un huracán, una oportunidad que se presenta raras veces. La comparación de estos datos obtenidos de manera independiente aumenta el valor científico de los valores derivados del satélite y asegura una mejor interpretación de los resultados.

METODOLOGÍA

REGIÓN DE ESTUDIO

Durante el verano, el sur del Golfo de California se caracteriza por presentar promedios de temperatura de 31°C y salinidad de 35 y una termoclina bien desarrollada aproximadamente a 75 metros de profundidad (Castro *et al.* 2000). Durante este periodo es común observar valores superficiales de clorofila-*a* (Chl *a*) menores a 1.0 mg m⁻³ y concentraciones máximas a 25 m de profundidad (Lara-Lara *et al.* 2003, Hidalgo-González y Alvarez-Borrego 2004). Scott-Pegau *et al.* (2002) reportan giros, meandros y corrientes de chorro a partir de mediciones por satélite de clorofila superficial durante el final del verano. La región oceánica al noroeste de la Península de Baja California ha sido estudiada usando satélites artificiales (Espinosa-Carreón *et al.* 2004), registrando promedios de temperatura superficial entre 21 y 17°C y concentraciones de Chl *a* entre 1.0 y 0.2 mg m⁻³. La región es influenciada por varias actividades humanas tales como acuicultura, pesca, ecoturismo, agricultura y producción de desechos municipales (Hyun 2005).

En el Pacífico Oriental Tropical, la temporada de huracanes de 2003 no fue la más activa, tampoco la que presentó los eventos de mayor intensidad,

comparada con la climatología regional. De 16 ciclones tropicales registrados durante ese año solamente siete se transformaron en huracanes y únicamente dos tocaron tierra en Baja California (Beven II *et al.* 2005). De acuerdo con el Centro de Predicción Tropical de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos, se cree que el Huracán Ignacio se originó de una onda tropical que se movió de África hacia la zona tropical del Océano Atlántico el 6 de agosto de 2003. La onda continuó desplazándose hacia el oeste cruzando Centroamérica el 16 de agosto. La estructura de la perturbación se organizó alrededor del día 20 del mismo mes justo al sur de Manzanillo, Colima, y progresó como depresión tropical el 23 de agosto, casi 200 km al oeste de Puerto Vallarta, Jalisco, México. Finalmente, se transformó en huracán el 24 de agosto, cuando sus vientos alcanzaron una intensidad máxima de 170 km h^{-1} (categoría 2 en la escala Saffir-Simpson) al cruzar la costa oriental del extremo sur de Baja California. Esta tormenta fue la primera de la temporada y se formó relativamente tarde con respecto a los registros existentes, que señalan el 17 de junio como promedio general (Beven II *et al.* 2005) para el inicio de la temporada. Tocó tierra exactamente al este de La Paz el día siguiente, con vientos estimados de 130 km h^{-1} . Ignacio se movió lentamente hacia el noroeste de la península para, finalmente, disiparse el 27 de agosto en la región central peninsular. Este trabajo estudia el área comprendida entre 20.5° – 26.9° N y 107° – 113° W, la cual corresponde a la entrada del Golfo de California, una región rica en diversidad biológica y recursos pesqueros.

DATOS *IN SITU*

Cabo Pulmo ($23^{\circ}25.223'$ N, $109^{\circ}24.404'$ W; Baja California Sur, México), está localizado en la parte sur oriental de la Península de Baja California y representa el único arrecife coralino dentro del Golfo de California. Sus características oceanográficas lo sitúan como un ambiente oligotrófico (Chl *a* $< 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ la mayor parte del año y Chl *a* $< 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ durante el verano) y cálido (entre 20 y 30° C durante el año) (Halfar *et al.* 2004). Allí se instaló un anclaje con sensores a 10 m de profundidad configurados para registrar datos de manera autónoma a intervalos de tiempo regulares. La temperatura se midió cada hora con un sensor HoBo (Onset) y la Chl *a* cada media hora con un fluorómetro sumergible (Self-Contained Underwater Fluorescence Apparatus, SCUFA, Turner Designs), calibrado con muestras discretas de Chl *a*.

IMÁGENES SATELITALES

El análisis de los campos superficiales de Chl *a* y temperatura al paso del Huracán Ignacio en el área de estudio se hizo con imágenes de satélite (80 archivos de nivel 2) de temperatura y color del océano del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), localizado a bordo de la plataforma Aqua de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). El cálculo de la temperatura superficial del mar (TSM) se basa en los canales del infrarrojo-medio (3.8–4.1 μm) y el infrarrojo térmico (11–12 μm) con el algoritmo no lineal (non-linear SST algorithm, NLSST) desarrollado y en uso operacional por el National Environmental Satellite Data and Information Service de la NOAA (Brown y Minnet 1999). Esta aproximación es similar al método multi canal (multi-channel sea surface temperature, MCSST) usado en el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, McClain *et al.* 1985). Las imágenes de Chl *a* (un índice de biomasa fitoplanctónica) se elaboraron usando el algoritmo OC3 de la NASA (O'Reilly *et al.* 2000).

A partir de los archivos individuales se obtuvieron imágenes compuestas (promedio de cada píxel) con toda la información disponible de 10 días antes (12 al 21 de agosto, correspondientes a 40 imágenes) y 10 días después (22 al 31 de agosto, 40 imágenes) del paso de la tormenta. Estas imágenes se elaboraron a una escala de 1 km por píxel para preservar la estructura espacial detallada y se suavizaron para eliminar valores extremos de cálculo, estimando la mediana en una matriz de 3 \times 3 píxeles. Las imágenes se usaron para extraer los datos en una área de 890 km de largo por 500 km de ancho (250 km a cada lado), siguiendo la trayectoria del centro del huracán. Todos los cálculos fueron hechos en el Instituto Bedford de Oceanografía, Canadá.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

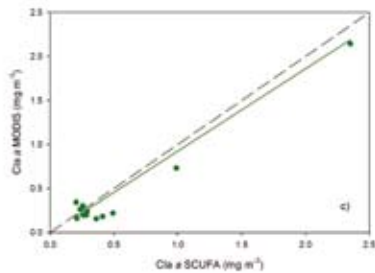
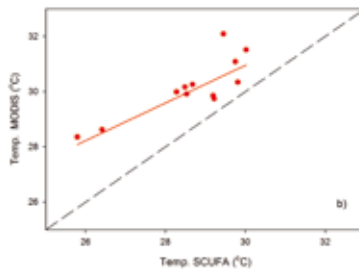
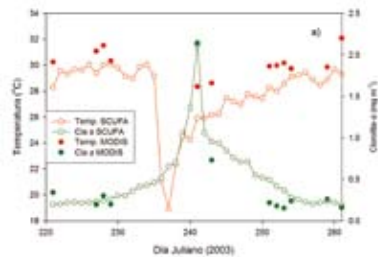
DATOS *IN SITU*

Los datos medidos en el anclaje (SCUFA) fueron promediados para representar el valor diario (fig. 1a) y compararlos con los registros de satélite, a fin de consolidar la interpretación de los resultados. La temperatura del agua tuvo fluctuaciones entre 28 y 30°C antes del paso del huracán, descendiendo hasta 18°C después de la tormenta. Las concentraciones de Chl *a* oscilaron entre 0.2 y 0.5 mg m⁻³, aumentando dramáticamente hasta más de 2 mg m⁻³ después del ciclón. De igual manera que la temperatura, los valores de pigmentos volvieron

Figura 1. (a) Media diaria de temperatura superficial del mar y clorofila *a*, medidos en Cabo Pulmo por el anclaje (SCUFA) y derivados del satélite MODIS (matriz de 5×5 píxeles).

Comparación (aproximada) entre los datos medidos *in situ* y los satelitales aplicando el Modelo II de regresión lineal (Standard Major Axis; Legendre y Legendre 1998).

(b) Regresión lineal de temperatura, con ordenada al origen = 10.50, pendiente = 0.68 y coeficiente de determinación $r^2 = 0.82$. (c) Comparación de mediciones para la clorofila *a* con ordenada al origen = -0.06, pendiente = 0.92 y $r^2 = 0.96$. La línea punteada indica una relación 1:1



a sus concentraciones típicas aproximadamente 20 días después del evento. Como consecuencia del paso del huracán, el cambio neto de temperatura *in situ* fue de -10°C y el incremento en la concentración de pigmento *in situ* fue 10 veces su valor original.

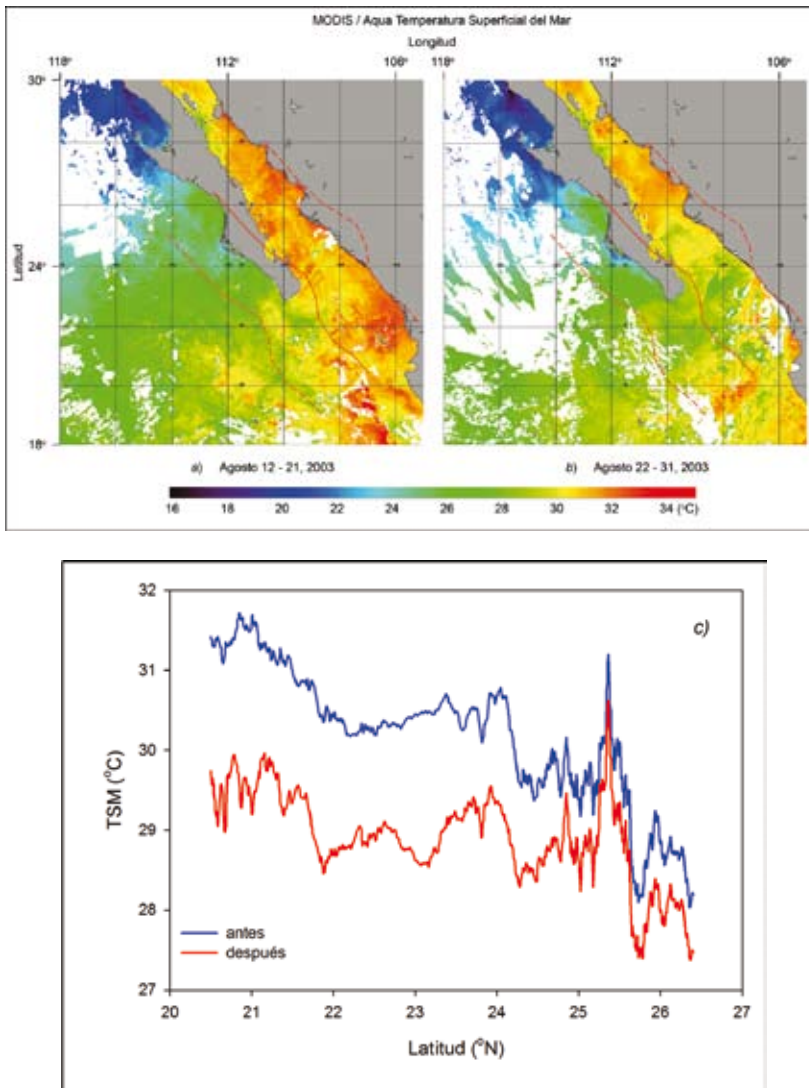
COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS *IN SITU* Y LOS DERIVADOS DE MODIS

Los valores derivados del satélite se obtuvieron de una matriz de 5×5 píxeles que contenía la localización geográfica del anclaje. La comparación (aproximada) entre los datos medidos *in situ* y los de satélite se realizó aplicando una regresión lineal que toma en cuenta la aleatoriedad en ambas variables (Model II, Standard Major Axis; Legendre y Legendre 1998). La figura 1b muestra los resultados correspondientes a la regresión lineal de temperatura: $T_{sat} = 0.68 T_{in\ situ} + 10.50$; $r^2 = 0.82$. La temperatura derivada del satélite es más alta que la registrada por el SCUFA por la diferencia en la concepción de las mediciones. Los datos SCUFA se registraron a 10 m de profundidad, en cambio los satelitales representan los primeros milímetros de la capa superficial. La figura 1c muestra la comparación de mediciones para la Chl *a*: $Chl\ a_{sat} = 0.92 Chl\ a_{in\ situ} - 0.06$; $r^2 = 0.96$. En este caso los resultados de la comparación son más cercanos entre sí porque el satélite mide la concentración de Chl *a* en la primera profundidad óptica (profundidad a la cual la irradiancia es reducida a $1/e$ de su valor superficial) de la columna de agua. El SCUFA estuvo posicionado dentro de este rango de profundidad. Los 25 píxeles MODIS mostraron una disminución de 3°C en la temperatura y un incremento de 10 veces en la biomasa de fitoplancton.

CAMBIOS EN LOS CAMPOS DE TEMPERATURA Y CHL *a* SUPERFICIALES

Con base en la hipótesis planteada, los vientos fuertes asociados con el paso de un huracán promueven el transporte de agua fría de las capas profundas a las capas superficiales enriqueciéndolas con nutrientes que sostienen una floración importante de fitoplancton. Las imágenes compuestas de la figura 2 muestran los campos de temperatura superficial del mar antes (a) y después (b) del paso de la tormenta. Los cambios de temperatura pueden ser considerados como una aproximación de los cambios en la capa de mezcla y de los nutrientes llevados a las capas superficiales (Fuentes-Yaco *et al.* 2005). Las

Figura 2. Imágenes compuestas de los campos de temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) (a) antes y (b) después del paso de la tormenta. (c) Datos extraídos de las imágenes del área de mayor impacto (890 km de longitud por 500 km de amplitud) y promediados paralelamente a la trayectoria del huracán. La línea azul representa la temperatura antes y la roja después del paso del huracán



estructuras pelágicas de mayor contraste térmico se observan al sur y al este de la trayectoria del huracán. Los datos extraídos de las imágenes bajo el área de mayor impacto (890 km de longitud por 500 km de amplitud) y promediados paralelamente a la trayectoria del huracán se presentan en la figura 2c. En ella se observa un gradiente térmico latitudinal con mayores temperaturas al sur que al norte de la región de estudio, mientras que las aguas sureñas muestran mayor amplitud de cambio que las norteñas. Los valores medios fluctuaron, de sur a norte, entre 32 y 28°C antes del ciclón y descendieron hasta 30 y 27°C después de la tempestad.

Las variaciones en los campos de Chl *a* antes y después (fig. 3a, b) del paso del huracán muestran un gradiente donde las concentraciones de biomasa de fitoplancton son menores en latitudes bajas comparadas con latitudes altas. Las particularidades más evidentes del impacto del huracán se observan al este de su trayectoria, sin embargo, una franja estrecha de concentraciones fuertes de pigmento es identificable al oeste de la península. Los valores promediados paralelamente a la trayectoria (fig. 3c) confirman las observaciones anteriores con cambios fuertes entre los 21 y 24°N, así como entre los 25 y 26°N.

En la figura 4 se presentan los cambios concurrentes en los gradientes de temperatura y biomasa de fitoplancton. En la figura 4a se muestra la diferencia de temperatura (después – antes) y en 4b la razón de cambio en biomasa fitoplanctónica (después:antes) entre las imágenes compuestas de antes y después del paso del huracán. Se observan estructuras complejas en los cambios de temperatura, con diferencias negativas entre 2 y 3°C, que en algunas regiones llegan a ser hasta de –6°C (fig. 4a). Estas estructuras corresponden con incrementos en Chl *a* entre 3 y 6 veces las concentraciones previas. Es importante notar que al sur de la península se observan regiones (saturadas en la escala de color) con incrementos superiores a 25 veces la concentración inicial de Chl *a* (fig. 4b). Conjuntamente, los valores de cambio promediados a lo largo de la trayectoria del huracán confirman, por un lado, el gradiente de cambio térmico sur-norte y, por otro, el incremento de la biomasa fitoplanctónica (fig. 4c). Después de reducir de 44500 a 890 píxeles, el gradiente de cambios térmicos promedia –1.3°C, con valores extremos de –2.4°C al sur y de –0.5°C al norte del área de estudio. Por su parte, el promedio de la razón de cambio en biomasa fitoplanctónica aumenta 1.5 veces su valor original con extremos de 0.6 y 3.0. La mayor concentración de valores altos es al sur de la entrada al Golfo de California, aunque algunos cambios también son importantes al noroeste de la península.

Figura 3. Imágenes compuestas de los campos de concentración de clorofila *a* (mg m^{-3}) (a) antes y (b) después del paso de la tormenta. (c) Datos extraídos y promediados a lo largo de la trayectoria del huracán. La línea azul representa la biomasa de fitoplancton antes y la roja después del paso del huracán

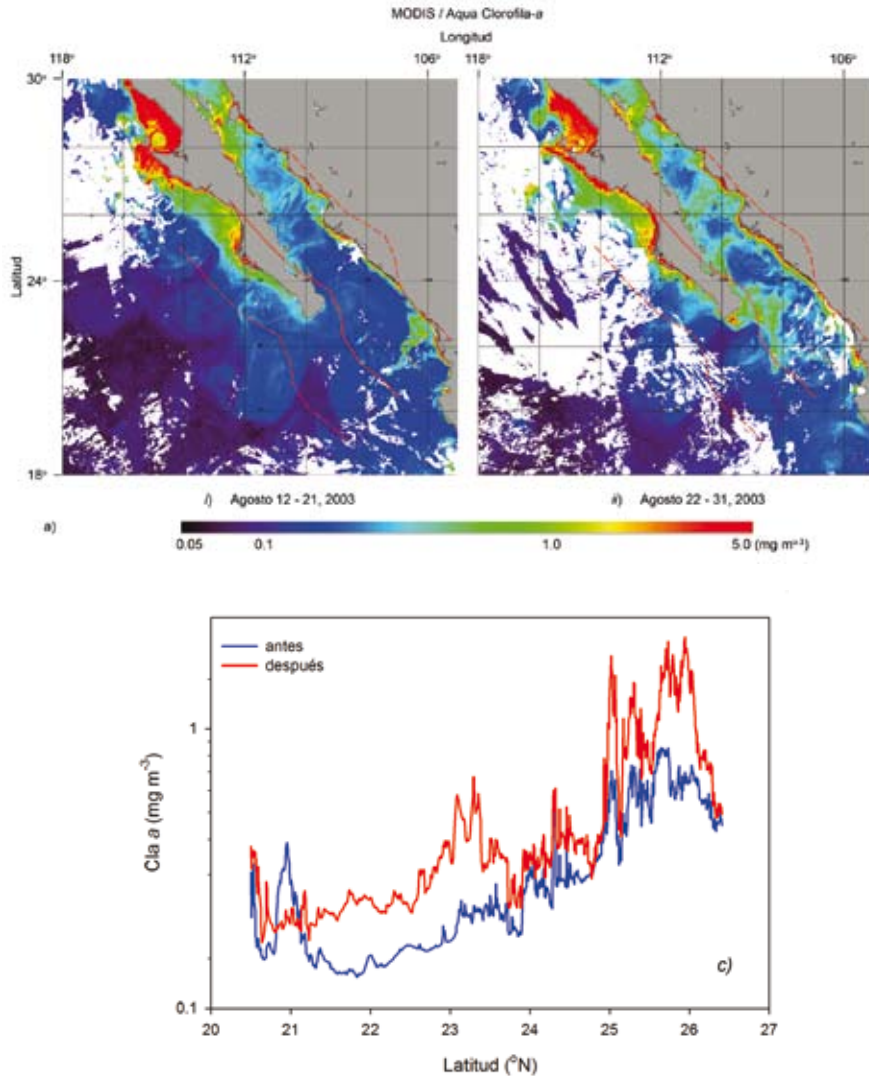
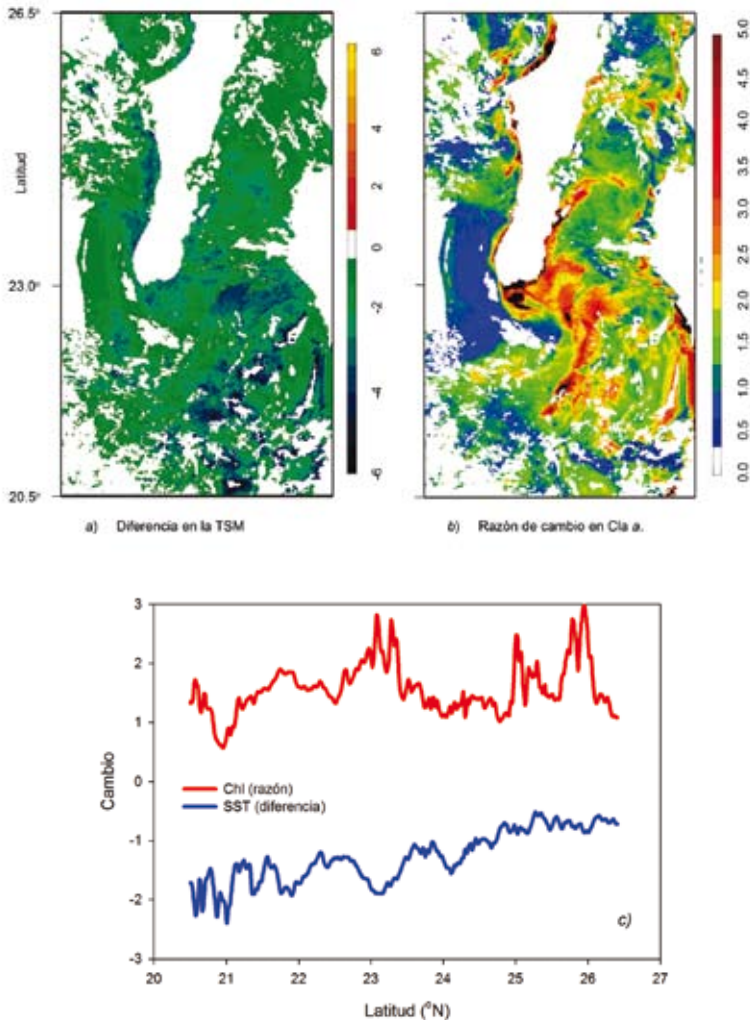
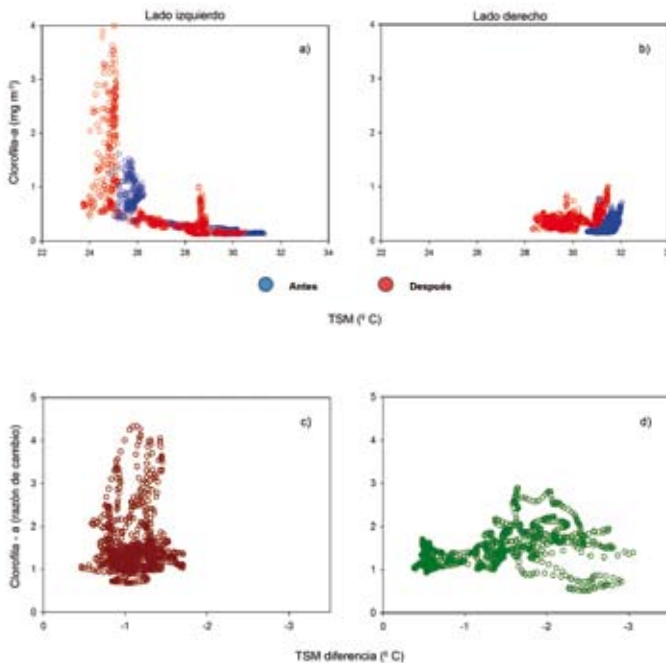


Figura 4. Cambios en los gradientes de temperatura y biomasa de fitoplancton centrados en la trayectoria del ciclón: (a) diferencia de temperatura (después-antes), (b) razón de cambio en biomasa fitoplanctónica (después:antes) entre las imágenes compuestas de antes y después del paso del huracán. (c) Los valores de cambio promediados (reducción de 44500 a 890 píxeles) a lo largo de la trayectoria del huracán muestran el gradiente térmico sur-norte y el incremento general de la biomasa fitoplanctónica. La línea azul representa la diferencia de temperatura y la roja la razón de cambio en biomasa de fitoplancton



La comparación entre los valores superficiales de temperatura y Chl *a* (promediados longitudinalmente) se muestra en los diagramas de dispersión de la figura 5. Los valores al lado izquierdo y derecho de la trayectoria antes y después del paso del Huracán Ignacio se observan en la figura 5a, b. Existe una mayor dispersión de magnitudes en ambas variables del lado izquierdo comparada con la del lado derecho. La comparación espacial de los cambios en temperatura y Chl *a* muestra incrementos de biomasa de segundo orden al lado izquierdo, con excepciones de hasta cuatro veces el valor original (fig. 5c, d). Mientras tanto, la temperatura cambia más del lado derecho, donde se localizan las aguas del interior del Golfo de California.

Figura 5. Concurrencia de valores satelitales de temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$) y de clorofila *a* (mg m^{-3}), promediados longitudinalmente. Datos a la izquierda (a) y derecha (b) de la trayectoria, antes (azul) y después (rojo) del paso del Huracán Ignacio. Comparación espacial de los cambios en temperatura (diferencias, después-antes) y en biomasa de fitoplancton (razón de cambio, después:antes), a la izquierda (c) y derecha (d) del centro de la trayectoria de la tormenta



En resumen, el conjunto de imágenes y gráficas de las figuras 3, 4 y 5, revelan con detalle el impacto del Huracán Ignacio en la región pelágica del Golfo de California. Un logro importante de este trabajo fue haber utilizado información de satélites para estudiar un fenómeno asociado a fuertes concentraciones nubosas.

CONCLUSIÓN

Los eventos físicos y biológicos estudiados son vitales para el conocimiento de los ecosistemas que rodean la Península de Baja California, en particular la entrada al Golfo de California y la región noroccidental de la península. Esta región ha sido históricamente y es actualmente una fuente de riqueza en biodiversidad y recursos pesqueros que se traduce en beneficios económicos para México. De mayor importancia es su función como una zona de gran dinámica en procesos de asimilación-liberación de carbono como resultado del paso de eventos meteorológicos de la magnitud de los huracanes, lo que ha sido demostrado en este trabajo con relación al paso del Huracán Ignacio. Este estudio ejemplifica la influencia de los ciclones en la generación de floraciones importantes de fitoplancton y los mecanismos implicados en la producción de recursos críticos para la cadena alimenticia, en particular para el sostenimiento de las pesquerías. Al final de esta serie de transformaciones biológicas se observa un incremento neto en la concentración de carbono orgánico (biomasa de fitoplancton) en la región pelágica marina. El uso sistemático de satélites artificiales para estudios futuros puede servir para analizar la respuesta del océano al paso de cada tormenta. También permitiría la evaluación de la incorporación de biomasa fitoplanctónica en cada temporada de huracanes para hacer una comparación interanual. Esta metodología ofrece la posibilidad de hacer estudios a largo plazo para cuantificar la frecuencia e intensidad de los huracanes y su impacto en el cambio climático a escalas espaciales y temporales de importancia nacional e internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a Saúl Alvarez-Borrego y Rubén Lara-Lara por ofrecernos la ocasión de integrar nuestros resultados en esta colección de estudios. Nuestra gratitud se extiende a Linda Payzant, Heidi Maass, George White III y Peter Payzant por su ayuda en el procesamiento de las imágenes satelitales. Las imágenes MODIS son cortesía de la NASA. Esta investigación se

circunscribe en el financiamiento otorgado por la Agencia Espacial Canadiense al Government Related Initiatives Program (GRIP). El estudio de campo fue financiado por VolkswagenStiftung, de Alemania (grant I/77446).

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez-Borrego S. 1983. Gulf of California. En: Ketchum BH (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas, Ecosystems of the World* 26, Elsevier Sci. Pub. Co., New York, pp. 427–449.
- Beven II, JL, Avila LA, Franklin JL, Lawrence MB, Pasch RJ, Stewart SR. 2005. Eastern North Pacific hurricane season of 2003. *Mon. Weather Rev.* 133: 1403–1415.
- Brown OB, Minnett PJ. 1999. MODIS infrared sea surface temperature algorithm. Algorithm theoretical basis document. Version 2.0, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf.
- Castro R, Mascarenhas A, Durazo R, Collins C. 2000. Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, México. *Cienc. Mar.* 26(4): 561–583.
- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J. Geophys. Res.* 109(C03039), doi:10.1029/2003JC002105.
- Fuentes-Yaco C, Devred E, Platt T, Sathyendranath S, Forget MH, Son SH. 2005. Principes physiques et interprétation de la réflectance spectrale marine (la couleur de l'océan) : applications aux données satellitaires. *Phys. Canada* 61(5): 215–226.
- Halfar J, Godínez-Orta L, Mutti M, Valdez-Holguín JE, Borges JM. 2004. Nutrient and temperature controls on modern carbonate production: An example from the Gulf of California, Mexico. *Geology* 32 (3): 213–216, doi: 10.1130/G20298.1
- Hidalgo-González RM, Alvarez-Borrego S. 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep-Sea Res.* II, 51: 739–752.
- Hyun K. 2005. Transboundary solutions to environmental problems in the Gulf of California Large Marine Ecosystem. *Coast. Manage.* 33: 435–445.
- Lara-Lara JR, Millán-Núñez E, Millán-Núñez R, Bazán-Núñez C. 2003. Producción primaria del fitoplancton en el Pacífico Mexicano (1992-2000). En: Barreiro-Güemes MT, Meave del Castillo ME, Signoret-Poillon M, Figueroa-Torres MG (eds.), *Planctología Mexicana*, Sociedad Mexicana de Planctología, AC, México, pp. 103–124
- Legendre P, Legendre L. 1998. *Numerical Ecology*, Elsevier Science, Amsterdam.

- McClain EP, Pichel WG, Walton CC. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.* 90: 11587–11601.
- O'Reilly JE et al. 2000. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. En: Hooker SB, Firestone ER (eds.), SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892 (Vol. 11), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. Pp. 9–23.
- Platt T, Bouman H, Devred E, Fuentes-Yaco C, Sathyendranath S. 2005. Physical forcing and phytoplankton distributions. *Scientia Marina* 69(1): 55–73.
- Scott-Pegau W, Boss E, Martínez A. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.* 29(9), doi: 10.1029/2001GL014076.
- Zehnder ZA, Gall RL. 1991. On a mechanism for orographic triggering of tropical cyclones in the Eastern North Pacific. *Tellus* 43A: 25–36.