



A novel Satellite-based Ocean Monitoring System for Mexico

Nuevo Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico para México

S Cerdeira-Estrada^{1*}, G López-Saldaña^{1,2}

¹ Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Ave. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Parques del Pedregal, Tlalpan 14010, México, DF.

² Current address: University College London, Department of Space and Climate Physics, Mullard Space Science Laboratory, Holmbury St. Mary, Dorking, Surrey, RH5 6NT, UK.

* Corresponding author. E-mail: s.cerdeira@gmail.com

ABSTRACT. To analyze patterns in marine productivity, harmful algal blooms, thermal stress in coral reefs, and oceanographic processes, optical and biophysical marine parameters, such as sea surface temperature, and ocean color products, such as chlorophyll-*a* concentration, diffuse attenuation coefficient, total suspended matter concentration, chlorophyll fluorescence line height, and remote sensing reflectance, are required. In this paper we present a novel automatic Satellite-based Ocean Monitoring System (SATMO) developed to provide, in near real-time, continuous spatial data sets of the above-mentioned variables for marine-coastal ecosystems in the Gulf of Mexico, northeastern Pacific Ocean, and western Caribbean Sea, with 1 km spatial resolution. The products are obtained from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images received at the Direct Readout Ground Station (located at CONABIO) after each overpass of the Aqua and Terra satellites. In addition, at the end of each week and month the system provides composite images for several ocean products, as well as weekly and monthly anomaly composites for chlorophyll-*a* concentration and sea surface temperature. These anomaly data are reported for the first time for the study region and represent valuable information for analyzing time series of ocean color data for the study of coastal and marine ecosystems in Mexico, Central America, and the western Caribbean.

Key words: Satellite-based Ocean Monitoring System, MODIS, chlorophyll-*a* concentration, sea surface temperature, anomaly.

RESUMEN. Para estudiar el comportamiento de la productividad marina, los florecimientos algales nocivos, el estrés térmico en los arrecifes de coral y los procesos oceanográficos, se requieren diversos parámetros ópticos y biofísicos marinos, como la temperatura superficial del mar, y productos del color del océano, como la concentración de clorofila *a*, el coeficiente de atenuación difusa, la concentración de material total suspendido, la fluorescencia de la clorofila y la reflectancia teledetectada. En este artículo se presenta un nuevo Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico (SATMO) automático desarrollado para proporcionar, en tiempo casi real, un seguimiento continuo de las variables antes mencionadas para los ecosistemas marino-costeros del Golfo de México, el Océano Pacífico nororiental y el Mar Caribe occidental, con una resolución espacial de 1 km. Los productos fueron obtenidos a partir de imágenes del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) recibidas en la estación terrena (ubicada en la CONABIO) después de cada paso de los satélites Aqua y Terra. Además, el sistema proporciona imágenes compuestas para varios productos oceánicos de la última semana y el último mes transcurrido, así como compuestos de anomalías semanales y mensuales de la concentración de clorofila *a* y la temperatura superficial del mar. Estos datos de anomalía se proporcionan por primera vez para la región de estudio y representan una información valiosa para analizar series temporales del color del océano para el estudio de los ecosistemas marinos y costeros en México, Centroamérica y el Caribe occidental.

Palabras clave: Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico, MODIS, concentración de clorofila *a*, temperatura superficial del mar, anomalías.

INTRODUCTION

Ocean color products such as chlorophyll-*a* concentration and chlorophyll fluorescence, as well as sea surface temperature are parameters related to many oceanographic processes. Real-time satellite observation systems are of vital importance in numerous ocean environment studies. For instance, sea surface temperature constitutes a good indicator of environmental stress and can be used to monitor the health of key marine ecosystems (e.g., coral reefs; Hu *et al.* 2009). It is also possible to determine the impact of hurricanes on the surface layers of the ocean by analyzing changes in sea surface temperature and chlorophyll-*a* (e.g., Platt *et al.* 2005).

INTRODUCCIÓN

Los productos del color del océano como la concentración de clorofila *a* y la fluorescencia de clorofila, así como la temperatura superficial del mar son parámetros relacionados con varios procesos oceanográficos. Los sistemas satelitales de observación en tiempo real son de suma importancia en los estudios del medio ambiente marino. Por ejemplo, la temperatura superficial del mar constituye un buen indicador del estrés ambiental y puede utilizarse para monitorear la salud de los ecosistemas marinos clave (e.g., arrecifes coralinos; Hu *et al.* 2009). También es posible determinar el impacto de los huracanes sobre las capas superficiales del océano al

Some Direct Readout Ground Stations (DRGS) around the world receive, in near real-time, data from different satellite sensors from which ocean products are generated for several regions of the world (e.g., Shutler *et al.* 2005, Sciarra *et al.* 2006). In Mexico, at the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO), a DRGS (marker C, fig. 1) receives and processes direct broadcast data (X-band) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on board NASA's Terra and Aqua satellites.

In this paper we present a novel automatic Satellite-based Ocean Monitoring System (SATMO) developed to provide, in near real-time, continuous spatial data sets of all of the above-mentioned variables for marine-coastal ecosystems in the Gulf of Mexico, northeastern Pacific Ocean, and western Caribbean Sea, with 1 km spatial resolution. This article describes new products provided by SATMO and complements methodologies reported in Cerdeira-Estrada and López-Saldaña (2008). At the end of each week and month the new system provides composite images for several ocean products, as well as weekly and monthly anomaly composites for chlorophyll-*a* concentration and sea surface temperature, using the mean climatology weekly or monthly composites for the period 2002–2009. Anomaly data are reported for the first time for the study region, representing valuable information for analyzing time series of ocean color data in studies of coastal and marine ecosystems in Mexico, Central America, and the western Caribbean.

MATERIAL AND METHODS

Description of the system

The study area encompasses all the waters adjacent to the 20,427 km coastline of Mexico and includes the northeastern Pacific Ocean (covering the Gulf of California and Gulf of Tehuantepec) and northwestern Atlantic Ocean (covering the Gulf of Mexico and western Caribbean Sea). The whole area lies within coordinates 3° N to 33° N and 122° W to 72° W. This area contains the Mesoamerican Reef in the western Caribbean Sea, which is the largest reef system in the Atlantic Ocean and the second largest worldwide, and provides key ecosystem services for the maintenance of marine productivity. The study area is vulnerable to the presence of hurricanes and harmful algal blooms (red tide events). In addition, a sub-study area was defined to include only the Mexican Pacific Ocean off the coast of the Baja California Peninsula and the Gulf of California (22.86–32.86° N, 122–107° W; fig. 1). Within this sub-study area, optical and biophysical *in situ* data are obtained (since 2007) by the ANTARES-Ensenada station (31.75° N, 116.95° W; marker A in fig. 1) and the Mexican California Current Research (IMECOCAL) program.

analizar cambios en la temperatura superficial del mar y la clorofila *a* (e.g., Platt *et al.* 2005).

Algunas estaciones terrenas localizadas alrededor del mundo reciben, en tiempo casi real, datos de diferentes sensores satelitales a partir de los cuales se generan productos oceánicos para varias regiones del mundo (e.g., Shutler *et al.* 2005, Sciarra *et al.* 2006). En México, en la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), una estación terrena (banda X) (marcada con una C en fig. 1) recibe y procesa datos directamente del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS por sus siglas en inglés) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA.

En este trabajo se presenta un nuevo Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico (SATMO) automático desarrollado para proporcionar, en tiempo casi real, un seguimiento continuo de las variables mencionadas arriba para los ecosistemas marinos y costeros del Golfo de México, el Océano Pacífico nororiental y el Mar Caribe occidental, con una resolución espacial de 1 km. Este artículo describe los nuevos productos proporcionados por el SATMO y complementa el trabajo de Cerdeira-Estrada y López-Saldaña (2008). Al final de cada semana y mes el sistema proporciona imágenes compuestas para varios productos oceánicos, así como compuestos de anomalías semanales y mensuales de la concentración de clorofila *a* y la temperatura superficial del mar, usando los compuestos de los promedios climatológicos semanales o mensuales para el periodo de 2002 a 2009. Por primera vez se presentan datos de anomalías para la región de estudio, los cuales proporcionan información valiosa para el análisis de series temporales de datos del color del océano en los estudios de los ecosistemas marinos y costeros de México, Centroamérica y el Caribe occidental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sistema

El área de estudio abarca todas las aguas adyacentes a los 20,427 km de costa de México, tanto del Océano Pacífico nororiental (incluyendo el Golfo de California y el Golfo de Tehuantepec) como del Océano Atlántico noroccidental (incluyendo el Golfo de México y el Mar Caribe occidental). Toda el área se encuentra dentro de las coordenadas 3° N a 33° N y 122° W a 72° W. El área contiene el Arrecife Mesoamericano en el Mar Caribe occidental, el cual es el sistema arrecifal más grande del Océano Atlántico y el segundo más grande del mundo, y proporciona servicios ecosistémicos clave para el mantenimiento de la productividad marina. El área de estudio es vulnerable a la presencia de huracanes y florecimientos algales nocivos (eventos de marea roja). Además, se definió una subárea de estudio que incluye sólo el Océano Pacífico mexicano frente a las costas de la península de Baja California y el Golfo de California (22.86–32.86° N, 122–107° W; fig. 1). Dentro de esta subárea

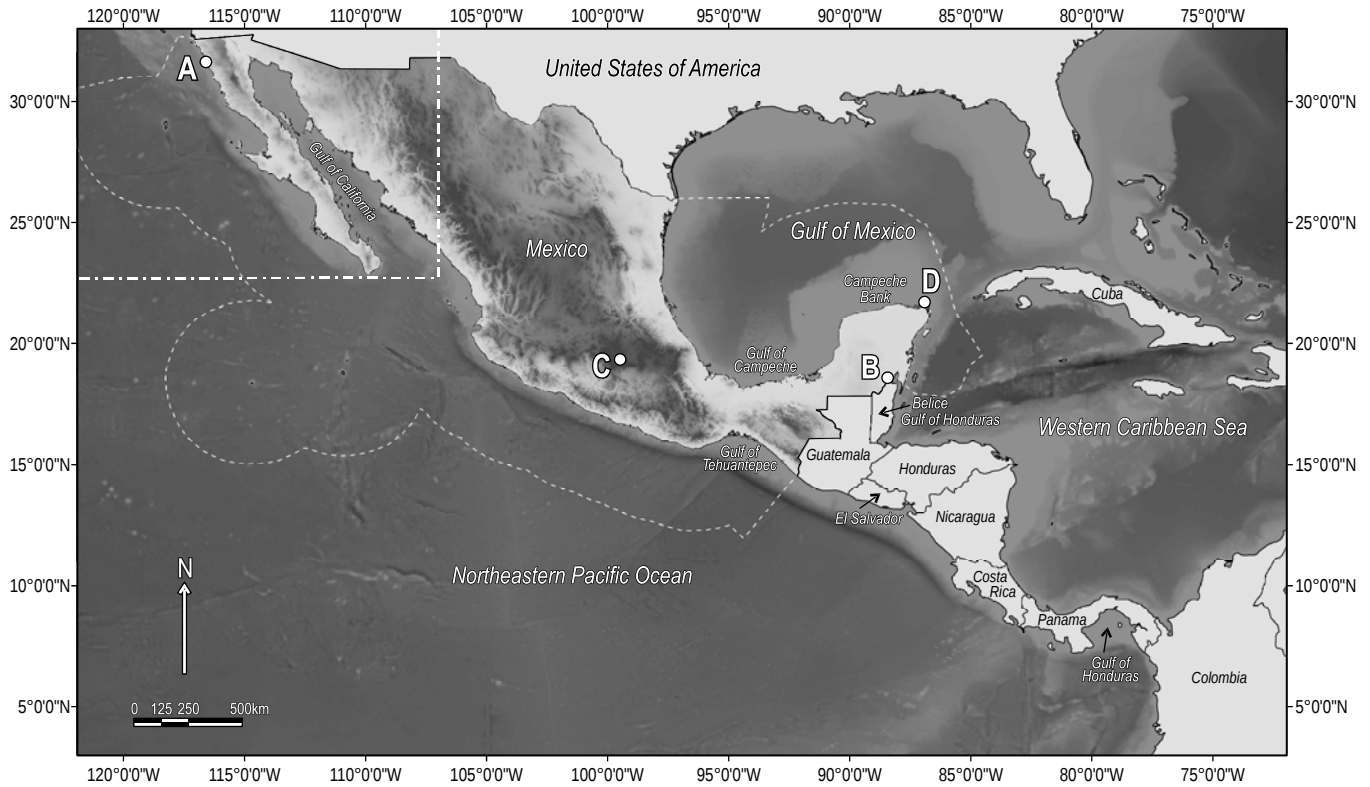


Figure 1. Area under study, including the northeastern Pacific Ocean and northwestern Atlantic Ocean. A: ANTARES-UABC fixed station. B: X-band antenna at Chetumal, Quintana Roo. C: X-band antenna at CONABIO. D: Yucatan Shelf. Dashed lines show Mexico's exclusive economic zone. Dash-dot lines show a sub-study area of the ANTARES network and IMECOCAL project.

Figura 1. Área de estudio, incluyendo el Océano Pacífico nororiental y el Océano Atlántico noroccidental. A: estación fija ANTARES-UABC. B: antena terrena (banda X) en Chetumal, Quintana Roo. C: antena terrena (banda X) en la CONABIO. D: plataforma de Yucatán. Las líneas discontinuas indican la zona económica exclusiva de México. Las líneas de punto y raya muestran una subárea de estudio de la red de ANTARES y el proyecto IMECOCAL.

Data sources

Data from MODIS sensors on the Terra and Aqua satellites are retrieved by the antenna at CONABIO. The coverage area of the antenna covers the entire study area (fig. 1). Each satellite provides data from Earth in 36 spectral bands between 0.405 and 14.385 μm , twice in the daytime and twice in the nighttime, with 250 m, 500 m, and 1 km spatial resolution (more details on NASA's website: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>).

We used the Real-time Software Telemetry Processing System (RT-STPS), creating native binary format EOS-compliant Production Data Set (PDS) Level-0 files.

Algorithms for MODIS ocean products

Real-time water-leaving radiances (L_w_λ , in $\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) are calculated using the algorithms of the NASA Ocean Biology Processing Group (OBPG), considering the spectral response of the MODIS sensor (see details

se obtienen datos ópticos y biofísicos *in situ* (desde 2007) por la estación ANTARES-Ensenada (31.75° N, 116.95° W; marcada con una A en fig. 1) y el programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL).

Fuentes de datos

Los datos provenientes de los sensores MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua se recogen por la antena en la CONABIO. La zona de cobertura de la antena cubre todo el área de estudio (fig. 1). Cada satélite proporciona datos de la Tierra en 36 bandas espectrales entre 0.405 y 14.385 μm , dos veces durante el día y dos veces durante la noche, con una resolución espacial de 250 m, 500 m y 1 km (mayores detalles en el sitio web de la NASA: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>).

Se utilizó la aplicación Real-time Software Telemetry Processing System (RT-STPS) para crear archivos de Nivel 0 en formato binario nativo PDS (EOS-compliant Production Data Set).

on the OBPg website: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Normalizing Lw_{λ} removes most of the solar zenith angle effects (Gordon and Wang 1994) by which the normalized water-leaving radiances (nLw_{λ} , $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) are obtained. Remote-sensing reflectances (Rrs_{λ} [dimensionless]) are calculated using semi-analytical algorithms: the ratio of nLw_{λ} and the mean nominal extraterrestrial solar irradiances ($F0_{\lambda}$, $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$). The Rrs_{λ} were calculated for nine spectral bands centered at $\lambda = 412, 443, 488, 531, 551, 667, 678, 748$, and $869\ nm$.

Chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a* or Chl_OC3, $mg\ m^{-3}$) is calculated from remote-sensing reflectance at 443, 488, and 551 nm, using the OC3M algorithm (O'Reilly *et al.* 2000). The real-time values of the phytoplankton chlorophyll fluorescence emission line height (FLH, $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) are obtained as the intensity of upwelled radiance in MODIS band 14 (676.7 nm) above the baseline created from bands 13 (665.1 nm) and 15 (746.3 nm) (Abbott and Letelier 1999).

The diffuse attenuation coefficient at 488 nm (Kd_{490} or K_{490} , m^{-1}) is calculated as the ratio between nLw_{λ} at 488 and 551 nm (Mueller 2000, Lee *et al.* 2005) and was found to be well correlated to Secchi depth.

The total suspended matter concentration (TSM or TSM_Clark, $mg\ L^{-1}$) is an experimental product, calculated using an empirical algorithm to express the statistical correlation between coincident *in situ* radiometric and TSM measurements (Clark 2002).

Finally, the system calculates sea surface temperature (SST, $^{\circ}C$) using two different algorithms. The standard SST is calculated using daytime (SST) and nighttime (NSST) Terra and Aqua images that include the difference between brightness temperature at 11 and 12 μm wavelengths, long-wave or thermal infrared (MODIS bands 31 and 32). The SST4 product is calculated using only nighttime images consisting of the difference between brightness temperature at 3.959 and 4.050 μm wavelength, short-wave infrared images (MODIS bands 20, 22, and 23), since SST4 is not valid during daytime due to solar reflection (Brown and Minnett 1999, Minnett *et al.* 2002).

RESULTS

Structure of core program: MODIS Ocean Product Swath

The system core program is common to the processing of all products using self-developed C-Shell Linux scripts, including command lines for the NASA SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS, version 5.3 for Linux) free software and IDL/SeaDAS C-Shell scripts.

From PDS files, the system produces MODIS Level-1A Swath radiance counts Local Area Coverage (LAC) 1-km Hierarchical Data Format (HDF) files (MOD_PR01) with corresponding MODIS geolocation HDF 1-km files (GEO or

Algoritmos para los productos oceánicos del MODIS

Las radiancias emergentes del agua en tiempo real (Lw_{λ} , en $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) se calculan usando los algoritmos proporcionados por el Grupo de Procesamiento de Oceanografía Biológica (OBPG) de la NASA, considerando la respuesta espectral del sensor MODIS (ver detalles en el sitio web del OBPg: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). La normalización de Lw_{λ} elimina la mayoría de los efectos del ángulo cenital solar (Gordon y Wang 1994) mediante el cual se obtienen radiancias emergentes del agua normalizadas (nLw_{λ} , $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$). Las reflectancias teledetectadas (Rrs_{λ} [adimensional]) se calculan utilizando algoritmos semianalíticos: la relación de nLw_{λ} y el promedio de las irradiancias solar nominal extraterrestres ($F0_{\lambda}$, $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$). Se calcularon las Rrs_{λ} para nueve bandas espectrales centradas en $\lambda = 412, 443, 488, 531, 551, 667, 678, 748$ y $869\ nm$.

La concentración de clorofila *a* (Chl-*a* o Chl_OC3, en $mg\ m^{-3}$) se calcula a partir de la reflectancia teledetectada a 443, 488 y 551 nm, usando el algoritmo OC3M (O'Reilly *et al.* 2000). Los valores en tiempo real de la fluorescencia de clorofila (FLH, $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) se obtienen como la intensidad de la radiancia emergida en la banda 14 (676.7 nm) del MODIS por encima de la línea de base creada a partir de las bandas 13 (665.1 nm) y 15 (746.3 nm) (Abbott y Letelier 1999).

El coeficiente de atenuación difusa a 488 nm (Kd_{490} o K_{490} , m^{-1}) se calcula como la relación entre nLw_{λ} a 488 y 551 nm (Mueller 2000, Lee *et al.* 2005) y se encontró una buena correlación con la profundidad de Secchi.

La concentración de material total suspendido (TSM o TSM_Clark, $mg\ L^{-1}$) es un producto experimental, calculado usando un algoritmo empírico para expresar la correlación estadística entre mediciones coincidentes radiométricas *in situ* y de TSM (Clark 2002).

Finalmente, el sistema calcula la temperatura superficial del mar (SST, $^{\circ}C$) utilizando dos algoritmos diferentes. La SST estándar se calcula mediante imágenes diurnas (SST) y nocturnas (NSST) de Terra y Aqua que incluyen la diferencia entre la temperatura de brillo en las longitudes de onda de 11 y 12 μm , de onda larga o del infrarrojo térmico (bandas 31 y 32 del MODIS). El producto SST4 se calcula usando sólo las imágenes nocturnas que consisten de la diferencia entre la temperatura del brillo en las longitudes de onda de 3.959 y 4.050 μm , imágenes infrarrojas de onda corta (bandas 20, 22 y 23 del MODIS), ya que SST4 no es válido durante el día debido a la reflexión solar (Brown y Minnett 1999, Minnett *et al.* 2002).

RESULTADOS

Estructura del programa base: Productos oceánicos del barrido (Swath) del MODIS

El programa base del sistema es común para el procesamiento de todos los productos utilizando guiones o *scripts* en

MOD_PR03). The MODIS Level-1A contains digitized raw detector count data for all 36 MODIS spectral bands. MODIS GEO HDF files contain for each 1-km pixel arrays of latitude/longitude and imaging angles. The MODIS Level-1A and GEO files are used to create the MODIS Level-1B Swath LAC 1-km (MOD_PR02) NCSA HDF files (version 4.1, release 5), which contain calibrated and geolocated radiances.

MODIS Mapped Ocean Products

Using MODIS Level-1B Swath HDF and GEO files, and by applying atmospheric corrections and bio-optical algorithms to the MODIS data, the system generates two HDF MODIS Level-2 Swath LAC files at 1 km with ocean products associated with biogeophysical parameters, but without a specific projection. The first HDF file includes the following daytime oceanic products: SST, Chl_OC3, K_490, TSM_Clark, and FLH, as well as Rrs_λ; the second includes the following nighttime products: NSST and SST4. Each HDF file includes product quality files indicating algorithm failure or warning conditions at the pixel level (qual_sst or qual_sst4 and l2_flags). All the specified quality levels are combined into one loaded band.

HDF MODIS Mapped Ocean Product Level-2 files (1 km) in cylindrical equidistant projection with Datum WGS84 are obtained for the daytime products Chl_OC3, FLH, TSM_Clark, K_490, and SST, and the nighttime products NSST and SST4, from each day-nighttime Level-2 Swath MODIS overpass. The system generates MODIS Level-2 Mapped Images (1 km) files for SST, NSST, SST4, and Chl_OC3 products in GeoTIFF format with their corresponding biogeophysical parameters using geographic projection with Datum WGS84, while XML metadata files are generated using the US Federal Geographic Data Committee (FGDC) standards.

In addition, the system provides corresponding quick-look images in Portable Network Graphics (PNG) format using the HDF MODIS L2 Mapped files with scale and color palettes (color look-up table) designed specifically to obtain better visualization within the range corresponding to the maximum and minimum annual mean values in each case. According to the thresholds for the study area, Chl_OC3 is in the range 0.04–40 mg m⁻³ and FLH between 0.001 and 0.1 mWcm⁻² μm⁻¹ sr⁻¹, both in logarithmic scale, while SST is in the range 13–32 °C in linear scale (see fig. 2); TSM_Clark is in the range 0.1–30 mg L⁻¹ and K_490 between 0.03 and 1 m⁻¹ in logarithmic scale, while NSST and SST4 are in the range 13–32 °C in linear scale. We also included a script in the system that generates Google Earth KMZ files, ZIP compacted Keyhole Markup Language (KML), to see quick-look images interactively in Google Earth.

C-Shell de desarrollo propio para Linux, incluyendo las líneas de comandos para el programa gratuito Sistema de Análisis de Datos SeaWiFS (SeaDAS, versión 5.3 para Linux) desarrollado por la NASA y *scripts* en C-Shell para IDL/SeaDAS.

A partir de los archivos PDS el sistema produce niveles de radiancias a través del Nivel 1A del barrido (Swath) del MODIS con resolución espacial de 1 km (Cobertura de Área Local o LAC) en formato HDF (Hierarchical Data Format) (MOD_PR01) con sus correspondientes archivos MODIS de geolocalización (GEO o MOD_PR03) en formato HDF a 1 km. El MODIS Nivel 1A contiene los datos crudos digitalizados de los niveles en el detector para las 36 bandas espectrales del MODIS. Los archivos MODIS GEO en formato HDF contienen para el arreglo de 1 km de pixel la latitud o longitud y ángulos de proyección de la imagen. Los archivos MODIS Nivel 1A y GEO son utilizados para crear los archivos MODIS Nivel 1B Swath a 1 km (LAC) (MOD_PR02) en formato HDF NCSA (versión 4.1, liberación 5), los cuales contienen las radiancias calibradas y geoposicionadas.

Productos oceánicos del MODIS proyectados

Utilizando el archivo MODIS Nivel 1B Swath en formato HDF y el archivo GEO y aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos para los datos del MODIS, el sistema genera dos archivos MODIS Nivel 2 Swath LAC a 1 km con productos oceánicos asociados a parámetros biogeofísicos, pero sin proyección específica. El primer archivo HDF incluye los siguientes productos oceánicos diurnos: SST, Chl_OC3, K_490, TSM_Clark y FLH, así como Rrs_λ; el segundo incluye los siguientes productos nocturnos: NSST y SST4. Cada archivo HDF incluye archivos de la calidad del producto que indican fallas del algoritmo o condiciones de alerta a nivel de pixel (qual_sst o qual_sst4 y l2_flags). Todos los niveles de calidad especificados se combinan en una banda.

Se obtienen archivos HDF del MODIS Nivel 2 (1 km) con productos oceánicos proyectados en proyección cilíndrica equidistante con Datum WGS84 para los productos diurnos Chl_OC3, FLH, TSM_Clark, K_490 y SST, y los productos nocturnos NSST y SST4, a partir de cada paso diurno-nocturno del MODIS Nivel 2 Swath. El sistema genera imágenes proyectadas del MODIS Nivel 2 (1 km) para los productos SST, NSST, SST4 y Chl_OC3 en formato GeoTIFF con sus parámetros biogeofísicos correspondientes usando la proyección geográfica con Datum WGS84, mientras que los archivos de metadatos XML se generan usando los estándares del Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC) de los Estados Unidos.

Además, el sistema proporciona las imágenes de vista rápida correspondientes en formato PNG (Portable Network Graphics) usando los archivos HDF MODIS Nivel 2 proyectados con paletas de escala y colores diseñadas específicamente para obtener una mejor visualización dentro del

MODIS/Aqua weekly-monthly composite: Mean, mean climatology, and anomaly

Weekly (8 days) and monthly composite MODIS Level-3 files for Chl_OC3, FLH, TSM_Clark, K_490, SST, NSST, and SST4, with 1 km spatial resolution, are created using the HDF Mapped Ocean Product Level-2 files, after each Aqua/MODIS overpass.

Weekly and monthly anomaly MODIS/Aqua composites are generated using weekly (8 days) and monthly composite Level-3 files for Chl_OC3, SST, and NSST, for each Aqua/MODIS image overpass with 1 km spatial resolution and weekly or monthly mean climatology image composites. These mean climatology image composites include data from seven consecutive years (from 4 July 2002 to 3 July 2009). Animations of these image composites are also available.

For each HDF MODIS Mapped Ocean Product Level-3 file (weekly/monthly image composites and anomaly composites), the system provides the corresponding quick-look image with its scale and a specific color palette, and Level-3 images in GeoTIFF format with their corresponding biogeophysical parameters, using geographic projection with Datum WGS84, the XML metadata files and the KMZ files.

Special RGB MODIS mapped composite

The system generates in near real-time water-leaving radiance data in three visible MODIS bands after each satellite pass. This Special RGB-439 is created using band 4 of MODIS (555 nm), band 3 (469 nm) at 500 m resolution, and band 9 (443 nm), which is resampled from 1 km to 500 m. This composite, which uses different MODIS bands than previously reported by Hu *et al.* (2005), has a better spatial resolution and allows a better qualitative analysis regarding the presence of suspended particulate matter, colored dissolved material and algal blooms. Special RGB-439 is available in quick-look images, in GeoTIFF format with geographical projection and its corresponding geospatial XML metadata, as well as KMZ files to view in Google Earth.

SATMO application to the study of upwelling events in the region

Both the ocean color and SST satellite images from our operational system (2002–2009) allowed us to easily identify and follow the propagation of wind-driven oceanic upwelling, as well as the associated evolution and frequency of eddy generation in the Gulf of Tehuantepec (Mexico), the Gulf of Papagayo (bordering Nicaragua and Costa Rica), and the Gulf of Panama (see figs. 1, 2). These winds produce the displacement of high amounts of superficial warm waters that can give rise to upwelling of deeper cold waters with high phytoplankton productivity and Chl-*a* concentration (fig. 2).

intervalo que corresponde a los valores promedios anuales máximos y mínimos en cada caso. Según los umbrales para el área de estudio, la Chl_OC3 presenta un intervalo de 0.04 a 40 mg m⁻³ y la FLH de 0.001 a 0.1 mWcm⁻² μm⁻¹ sr⁻¹, ambos en escala logarítmica, mientras que la SST presenta un intervalo de 13 a 32 °C en escala lineal (ver fig. 2); la TSM_Clark presenta un intervalo de 0.1 a 30 mg L⁻¹ y K_490 de 0.03 a 1 m⁻¹ en escala logarítmica, mientras que la NSST y la SST4 presentan un intervalo de 13 a 32 °C en escala lineal. También se incluyó un *script* dentro del sistema que genera archivos KMZ de Google Earth, es decir, archivos de Lenguaje de Marcado Keyhole (KML) compactados en ZIP, para visualizar de forma interactiva las imágenes de vista rápida en Google Earth.

Compuesto semanal-mensual del MODIS/Aqua: Promedio, promedio climatológico y anomalía

Se crean archivos basados en los compuestos MODIS Nivel 3 semanales (8 días) y mensuales para Chl_OC3, FLH, TSM_Clark, K_490, SST, NSST y SST4, a 1 km de resolución espacial, a partir de los archivos HDF de los productos oceánicos MODIS Nivel 2 proyectados, después de cada paso del Aqua/MODIS.

Se generan compuestos de anomalías semanales y mensuales para el MODIS/Aqua a partir de archivos Nivel 3 de compuestos semanales (8 días) y mensuales de Chl_OC3, SST y NSST, para cada paso del Aqua/MODIS a 1 km de resolución espacial y los compuestos de imágenes promedio climatológicas semanales y mensuales. Estos compuestos de promedio de imágenes climatológicas incluyen datos de siete años consecutivos (del 4 de julio de 2002 al 3 de julio de 2009). Estos compuestos de imágenes también están disponibles en animaciones.

Para cada archivo de los productos oceánicos HDF MODIS Nivel 3 proyectados (imágenes compuestas semanales/mensuales y compuestos de las anomalías), el sistema proporciona la imagen de vista rápida correspondiente junto con su escala y paleta de colores específica, así como imágenes de Nivel 3 en formato GeoTIFF con sus parámetros biogeofísicos correspondientes, usando la proyección geográfica con Datum WGS84, los archivos de metadatos en XML y los archivos KMZ.

Compuesto RGB Especial del MODIS proyectado

El sistema genera, en tiempo casi real, datos de radiancias emergentes del agua en tres bandas visibles del MODIS después de cada paso del satélite. El RGB-439 Especial es creado usando la banda 4 del MODIS (555 nm), la banda 3 (469 nm) a una resolución de 500 m y la banda 9 (443 nm) que se remuestrea de 1 km a 500 m. Este compuesto, que utiliza diferentes bandas del MODIS que las documentadas por Hu *et al.* (2005), tiene una mejor resolución espacial y permite un mejor análisis cualitativo en cuanto a la presencia de material particulado en suspensión, material disuelto de

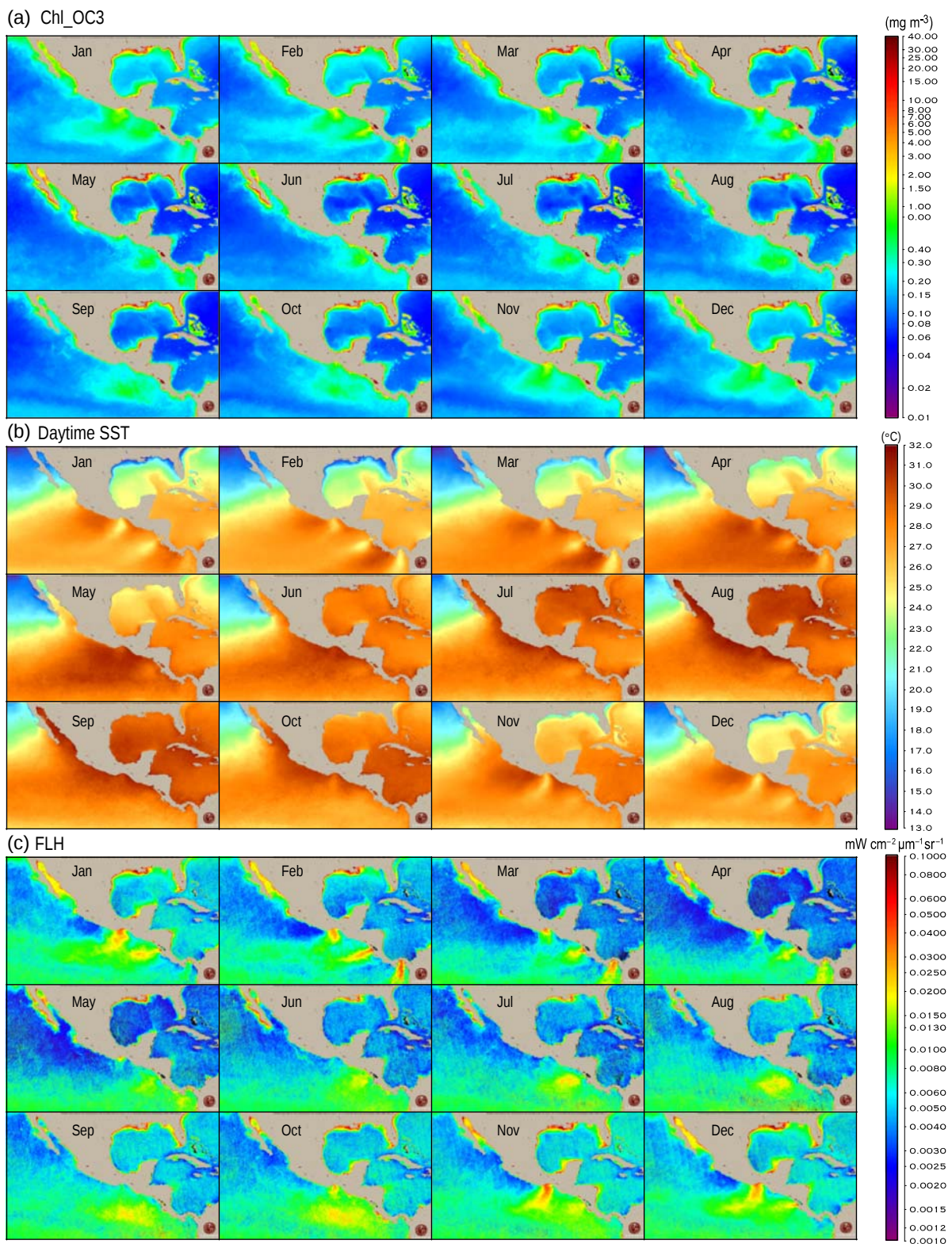


Figure 2. MODIS/Aqua monthly mean climatology composites for 2002–2009: (a) chlorophyll-*a* concentration (Chl_OC3, mg m^{-3}), (b) daytime sea surface temperature (SST, $^{\circ}\text{C}$, 11 and 12 μm), and (c) chlorophyll fluorescence line height (FLH, $\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$). Grey color means land.

Figura 2. Compuestos de imágenes promedio climatológicos mensuales de MODIS/Aqua para 2002–2009: (a) concentración de clorofila *a* (Chl_OC3, mg m^{-3}), (b) temperatura superficial del mar diurna (SST, $^{\circ}\text{C}$, 11 y 12 μm), y (c) fluorescencia de clorofila (FLH, $\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$). El color gris indica tierra.

Lluch-Cota *et al.* (1997), using images from the Coastal Zone Color Scanner (CZCS, 1978–1986), reported that the upwelling events in the gulfs of Tehuantepec and Papagayo occur between October and April; however, the MODIS/Aqua monthly mean high spatial resolution composites for Chl_OC3, SST, and FLH produced by SATMO show in more detail that these upwelling wind events occur in sequence first in the Gulf of Tehuantepec (starting in October, with maximum upwelling intensity in November, and ending in June), then in the Gulf of Papagayo (starting in November, with maximum upwelling intensity in February, and ending in May), and finally in southern Panama (starting in January, with maximum upwelling intensity in February, and ending in June) (fig. 2).

Our preliminary image analysis also confirms that reported by González-Silvera *et al.* (2004), who showed, based on a cross-correlation analysis, an inverse relationship between SST and Chl_OC3 for a short period of time (November 1998 to March 1999), where a decrease in SST was followed by an increase in Chl-*a* concentration values, indicating high growth and primary production rates.

Another important upwelling event in the Gulf of Mexico has been observed in the eastern Yucatan Shelf (marker D, fig. 1) since 1966. Cochrane (1966) suggested that bottom friction of the strong Yucatan Current against the slope on the eastern edge of the Yucatan Shelf could be causing this effect. Merino (1997) observed that the strength of the upwelling process depends largely on changes in the intensity of the Yucatan Current, and the event is related to the local wind, especially during spring and summer.

Using remote sensing, time-series data and temporal-spatial variation of Chl_OC3 and SST in this region, Pérez *et al.* (1999) reported a quasipermanent frontal zone in the northeast of Cabo Catoche, parallel to the eastern shelf break of the Yucatan Peninsula. González *et al.* (2000) studied the near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea by CZCS ocean color satellite imagery and also found that Campeche Bank off the Yucatan Peninsula shows high pigment concentrations all year round. We found, for all the years examined, elevated concentrations of Chl-*a* around the frontal zone (fig. 2), using MODIS/Aqua monthly mean composite images and monthly mean climatology composites for 2002–2009 for the Chl_OC3 and SST parameters provided by SATMO.

Another way to study upwelling events in time and space is by studying anomalies based on specific climatology (see fig. 3). For February 2009, for example, we observed a negative anomaly of SST and positive anomalies of Chl-*a* in the gulfs of Papagayo and Tehuantepec. A more complete multiyear analysis of the evolution of this event is under study looking for causes and possible explanations for its occurrence with the high spatial and temporal resolution provided by SATMO (1-km weekly and monthly anomalies).

color y florecimientos algales. El RGB-439 Especial está disponible en las imágenes de vista rápida, en archivos GeoTIFF con proyección geográfica junto a su correspondiente archivo XML de metadatos geoespaciales y en archivos KMZ para visualizar en Google Earth.

Aplicaciones del SATMO en estudios de eventos de surgencia en la región

Tanto las imágenes satelitales del color del océano como las de SST obtenidas a partir de nuestro sistema operacional (2002–2009) nos permitieron identificar con facilidad y dar seguimiento a la propagación de surgencias oceánicas producidas por el viento, así como la evolución asociada y frecuencia de la generación de giros en los golfos de Tehuantepec (México), Papagayo (entre Nicaragua y Costa Rica) y Panamá (ver figs. 1, 2). Estos vientos producen el desplazamiento de grandes cantidades de aguas cálidas superficiales que provocan la surgencia de aguas frías profundas con una alta productividad fitoplanctónica y concentración de Chl-*a* (fig. 2).

Lluch-Cota *et al.* (1997), mediante imágenes del Sensor de Color de la Zona Costera (CZCS, 1978–1986), encontraron que los eventos de surgencia en los golfos de Tehuantepec y Papagayo se presentan entre octubre y abril; sin embargo, los compuestos de promedios mensuales con alta resolución espacial del MODIS/Aqua para Chl_OC3, SST y FLH producidas por el SATMO muestran en mayor detalle que tales eventos de surgencia inducidos por el viento se presentan de forma secuencial, primero en el Golfo de Tehuantepec (iniciando en octubre, con una máxima intensidad de la surgencia en noviembre, y finalizando en junio), luego en el Golfo de Papagayo (iniciando en noviembre, con una máxima intensidad de la surgencia en febrero, y finalizando en mayo), y finalmente en el sur de Panamá (iniciando en enero, con una máxima intensidad de la surgencia en febrero, y finalizando en junio) (fig. 2).

Nuestro análisis preliminar de las imágenes confirma lo informado por González-Silvera *et al.* (2004), quienes mostraron, mediante un análisis de correlación cruzada, una relación inversa entre SST y Chl_OC3 durante un periodo de tiempo corto (noviembre de 1998 a marzo de 1999), cuando una disminución en la SST precedió un aumento en la concentración de Chl-*a*, lo cual indica altas tasas de producción primaria y de crecimiento.

Otro evento importante de surgencia en el Golfo de México ha sido observado desde 1966 en la parte oriental de la plataforma de Yucatán (D en fig. 1). Cochrane (1966) sugirió que la fricción de fondo generada cuando la Corriente de Yucatán choca contra el talud del lado oriental de la plataforma podría estar causando este efecto. Según Merino (1997), la fuerza del proceso de surgencia depende en gran parte de los cambios en la intensidad de la Corriente de Yucatán y el evento se relaciona con el viento local, especialmente durante la primavera y el verano.

DISCUSSION

As already indicated, the new automatic, near real-time, operational processing system presented for the continuous monitoring of phytoplankton, SST, and other ocean color products, using MODIS images from DRGS-CONABIO (X-band), is oriented to analyze spatial and temporal variability of SST and Chl_OC3, as well as their tendency and possible connection with climatic phenomena. This open-source system can be implemented in any other DRGS, such as the station located in Chetumal, Quintana Roo (marker B, fig. 1). The combination of ocean color with the Special RGB MODIS data composites processed by SATMO allows the identification of shallow bottom waters, plumes, sediments, and blooms with better precision than previous systems.

This operational system provides, for the first time, ocean color products for the seas off Mexico and Central America, in quasi real-time, weekly and monthly ocean parameter composites, as well as anomaly composites with 1-km spatial resolution. Other previously developed systems cover smaller areas and the products have lower spatial resolution

Con base en datos de sensores remotos, de series de tiempo y de la variación espaciotemporal de la Chl_OC3 y la SST en esta región del Golfo de México, Pérez *et al.* (1999) encontraron una zona frontal casi permanente al noreste de Cabo Catoche, paralela al talud de la plataforma oriental de la Península de Yucatán. González *et al.* (2000) analizaron la distribución superficial del fitoplancton en el Mar Intraamericano occidental mediante imágenes satelitales del color del océano CZCS y también encontraron que el Banco de Campeche en frente de la Península de Yucatán muestra altas concentraciones de pigmentos durante todo el año. Nosotros observamos, para todos los años analizados, altas concentraciones de Chl-*a* alrededor de la zona frontal (fig. 2), usando del MODIS/Aqua tanto compuestos de imágenes promedio mensuales como compuestos de imágenes promedio climatológicos para 2002–2009 de los parámetros de Chl_OC3 y SST obtenidos del SATMO.

Otra forma de estudiar los eventos de surgencia tanto espacial como temporalmente es mediante el análisis de anomalías con base en una climatología específica (ver fig. 3). Para febrero de 2009, por ejemplo, observamos una anomalía

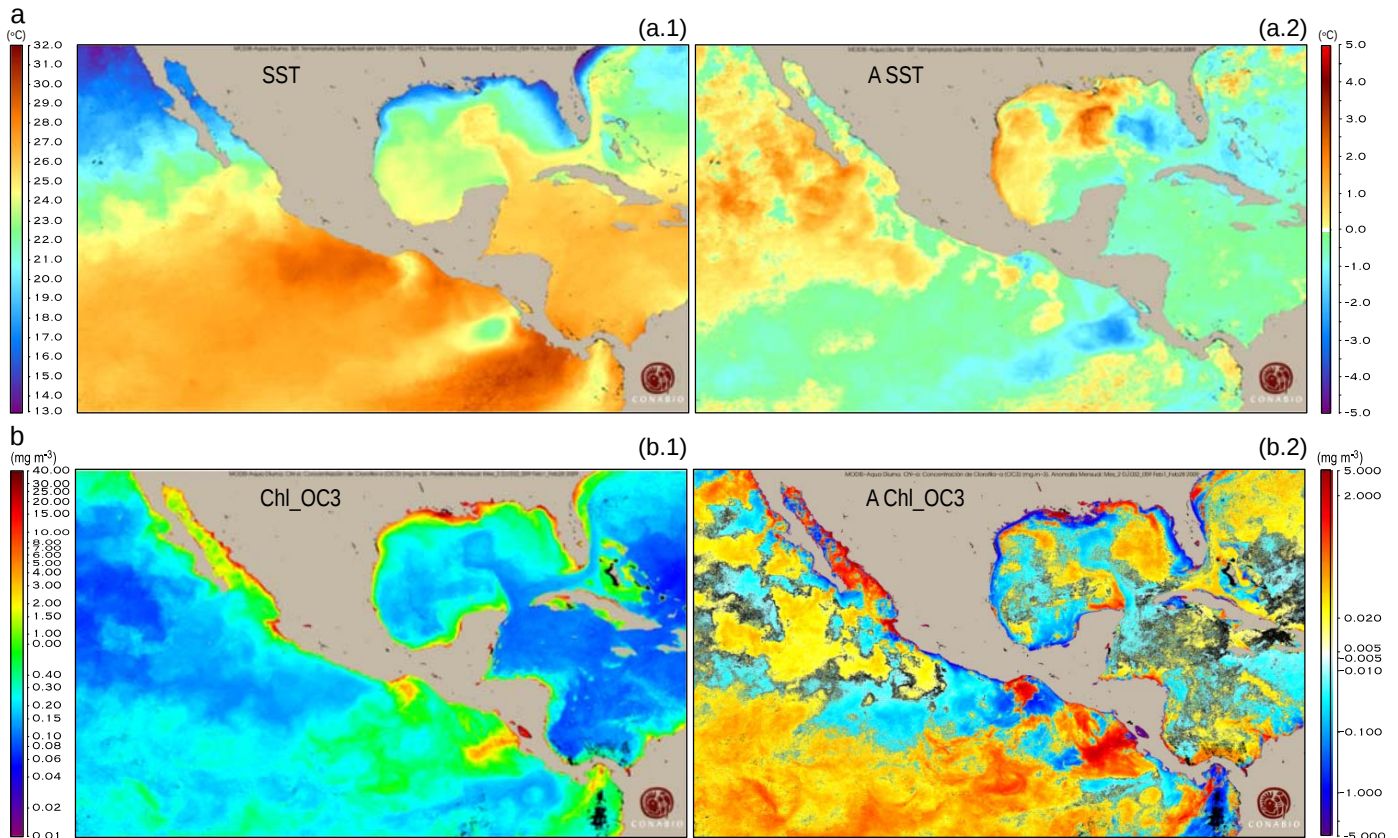


Figure 3. MODIS/Aqua images for February 2009. (a) Daytime sea surface temperature (SST, °C, 11 and 12 μm): (a.1) monthly mean composite and (a.2) monthly mean anomaly composite. (b) Chlorophyll-*a* concentration (Chl_OC3, mg m^{-3}): (b.1) monthly mean composite and (b.2) monthly mean anomaly composite. Grey color means land. Clouds and areas without satellite data are in black.

Figura 3. Imágenes de MODIS/Aqua para febrero de 2009. (a) Temperatura superficial del mar diurna (SST, °C, 11 y 12 μm): (a.1) compuesto del promedio mensual y (a.2) compuesto de la anomalía promedio mensual. (b) Concentración de clorofila *a* (Chl_OC3, mg m^{-3}): (b.1) compuesto del promedio mensual y (b.2) compuesto de la anomalía promedio mensual. El color gris indica tierra y el negro indica nubes y zonas que carecen de datos satelitales.

(4 or 9 km) and do not provide anomaly data. Another advantage is the calculation of the FLH parameter, which had not been considered by other systems in this study area. With this system it is possible to study marine productivity, harmful algal blooms, thermal stress in coral reefs, upwelling events, and other oceanographic processes in the region.

SATMO was used to study the wind-driven oceanic upwelling and frequency of eddy generation in the gulfs of Tehuantepec, Papagayo, and Panama, confirming events previously reported and complementing them by studying SST and Chl-*a* anomalies to obtain a better insight on the causes and possible explanations of their occurrence.

The biogeophysical marine products obtained by SATMO can be consulted on the CONABIO website: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/satmo>.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the CONABIO-Biodiversity Trust Fund. We acknowledge the members of the Remote Sensing Group from the Department of Geomatics of the General Department of Bioinformatics (CONABIO), in particular R Ressler, MI Cruz-López, and R Jiménez-Rosenberg, for support and suggestions during this study.

REFERENCES

- Abbott MR, Letelier RM. 1999. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document. Chlorophyll Fluorescence (MODIS Product Number 20). College of Oceanic and Atmospheric Sciences. Oregon State University, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod22.pdf.
- Brown OB, Minnett PJ. 1999. MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document. Ver. 2.0. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf.
- Cerdeira-Estrada S, López-Saldaña G. 2008. Automatic processing of near-real time operational MODIS Ocean Products applied to Mexico seas monitoring. Fifth International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2008), 2008. Art. No. 4723456, pp. 545–549.
- Clark DK. 2002. MODIS Data Product Status. Numbers 19, 23, and 26. http://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/meetings/200207/presentations/clark.pdf.
- Cochrane JD. 1966. The Yucatan Current, upwelling off northeastern Yucatan, and currents and waters of Western Equatorial Atlantic. *Oceanography of the Gulf of Mexico*. Progress Rep. TAMU Ref. No. 66–23T, pp. 14–32.
- González NM, Muller-Karger FE, Estrada SC, de los Pérez RP, del Río IV, Pérez PC, Arenal IM. 2000. Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: The influence of El Niño and weather events. *J. Geophys. Res.* 105: 14029–14043.
- González-Silvera A, Santamaría-del-Angel E, Millán-Núñez R, Manzomón H. 2004. Satellite observations of mesoscale eddies in the gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep-Sea Res. (II Top. Stud. Oceanogr.)* 51: 587–600.
- Gordon HR, Wang M. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Appl. Opt.* 33: 443–452.

negativa de valores de SST y anomalías positivas de Chl-*a* en los golfos de Papagayo y Tehuantepec. Actualmente se realiza un análisis multianual más completo de la evolución de este evento para tratar de determinar las causas y posibles explicaciones de ello con la alta resolución espacial y temporal proporcionada por el SATMO (anomalías semanales y mensuales a 1 km).

DISCUSIÓN

Como ya se mencionó, el nuevo sistema de procesamiento automático y operacional en tiempo casi real que se ha presentado para el monitoreo continuo del fitoplancton, la SST y otros productos del color del océano, usando imágenes del MODIS recibidas en la estación terrena (banda X) de la CONABIO, está orientado para analizar la variación espacial y temporal de la Chl-*a* y la SST, así como su tendencia y posible relación con fenómenos climáticos. Este sistema de código abierto puede ser implementado en cualquier otra estación terrena, como la localizada en Chetumal, Quintana Roo (B en fig. 1). La combinación de datos del color del océano con los datos del compuesto RGB Especial del MODIS procesados por el SATMO permite la identificación de aguas someras, plumas, sedimentos y florecimientos con mayor precisión que otros sistemas anteriores.

Este sistema operacional proporciona, por primera vez, productos del color del océano para los mares de México y Centroamérica, en tiempo casi real, así como imágenes compuestas semanales y mensuales de parámetros oceánicos y compuestos de anomalías con una resolución espacial de 1 km. Otros sistemas desarrollados anteriormente cubren áreas más pequeñas y los productos tienen menor resolución espacial (4 ó 9 km) y no proporcionan datos de anomalías. Otra ventaja es el cálculo del parámetro FLH, el cual no se había considerado en otros sistemas para el área de estudio. Con el SATMO es posible estudiar la productividad marina, florecimientos algales nocivos, estrés térmico en los arrecifes de corales, eventos de surgencia y otros procesos oceanográficos en la región.

Se utilizó el SATMO para estudiar las surgencias inducidas por el viento y la frecuencia de la generación de giros en los golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá, y se confirmaron los eventos documentados con anterioridad. Además, se analizaron las anomalías de SST y Chl-*a* para obtener una mejor idea de las causas y posibles explicaciones de su presencia.

Los productos biogeofísicos marinos obtenidos por el SATMO se pueden consultar en el sitio web de la CONABIO: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/satmo>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Fideicomiso Fondo para la Biodiversidad de la CONABIO. Se agradece al grupo de la Subdirección de Percepción Remota de la Dirección de

- Hu C, Muller-Karger FE, Taylor CJ, Carder KL, Kelble C, Johns E, Heil CA. 2005. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 97: 311–321.
- Hu C, Muller-Karger F, Murch B, Myhre D, Taylor J, Luerksen R, Moses C, Zhang C, Gramer L, Hendee J. 2009. Building an automated integrated observing system to detect sea surface temperature anomaly events in the Florida Keys. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47: 2071–2084.
- Lee ZP, Darecki M, Carder KL, Davis CO, Stramski D, Rhea WJ. 2005. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods. *J. Geophys. Res. (C Oceans)* 110: 1–9.
- Lluch-Cota SE, Álvarez-Borrego S, Santamaría-del-Ángel E, Müller-Karger FE, Hernández-Vázquez S. 1997. The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: Spatial and temporal variation of satellite-derived photosynthetic pigments. *Cienc. Mar.* 23: 329–340.
- Merino M. 1997. Upwelling on the Yucatan shelf: Hydrographic evidence. *J. Mar. Syst.* 13: 101–121.
- Minnett PJ, Evans RH, Kearns EJ, Brown OB. 2002. Sea-surface temperature measured by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002)*, Toronto, Canada, 24–28 June 2002.
- Mueller JL. 2000. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm. In: O'Reilly JE and 24 coauthors, *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Part 3*. Hooker SB, Geomática adjunto a la Dirección General de Bioinformática (CONABIO), en particular a R Ressler, MI Cruz-López y R Jiménez-Rosenberg, su apoyo y sugerencias durante este estudio.
-
- Firestone ER (eds.), NASA/TM-2000-206892, Vol. 11, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 24–27.
- O'Reilly JE and 21 coauthors. 2000. Ocean color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: O'Reilly JE and 24 coauthors, *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Part 3*. NASA Tech. Memo. 2000-206892. Vol. 11. Hooker SB, Firestone ER (eds.), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland, pp. 9–23.
- Pérez R, Müller-Karger FE, Victoria I, Melo N, Cerdeira-Estrada S. 1999. Cuban, Mexican, US reserachers probing mysteries of Yucatan currents. *EOS. Trans. Am. Geophys. Union* 80: 158–159.
- Platt T, Bouman H, Devred E, Fuentes-Yaco C, Sathyendranath S. 2005. Physical forcing and phytoplankton distributions. *Scien. Mar.* 69: 55–73.
- Sciarra R, Böhm E, D'Acunzo E, Santoleri R. 2006. The large scale observing system component of ADRICOSM: The satellite system. *Acta Adriat.* 47 (Suppl.): 51–64.
- Shutler JD, Smyth TJ, Land PE, Groom SB. 2005. A near real-time automatic MODIS data processing system. *Int. J. Remote Sens.* 26: 1049–1055.

*Received December 2010;
accepted March 2011.*