

OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DE CLOROFILA EN LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Martha Lucero Bastidas-Salamanca¹

Efraín Rodríguez-Rubio²

Javier Roberto Ortiz Galvis³

Grupo de Estudios Oceanográficos y del Fenómeno El Niño,
Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP),
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia.
e-mail: mlbastidas@unicauca.edu.co ¹ erodiguez@dimar.mil.co ² jortiz@dimar.mil.co ³

Bastidas-Salamanca, M., E. Rodríguez-Rubio y J. Ortiz. 2006. Obtención y validación de clorofila en la Cuenca Pacífica Colombiana a partir de imágenes satelitales. Boletín Científico CCCP, (13): 33-40.

Recibido en mayo de 2006; aceptado en diciembre de 2006

RESUMEN

Durante los años 2003, 2004 y 2005 la concentración de clorofila α en la Cuenca Pacífica Colombiana fue determinada a partir de imágenes satelitales del color del océano para aplicaciones en Oceanografía, identificando zonas de productividad primaria. Para ello, se utilizaron datos del sensor satelital MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) los cuales fueron comparados con datos *in situ* obtenidos espectrofotométricamente para evaluar su desempeño, dando como resultado a partir de análisis de correlación (r) un ajuste lineal de 0.7 y subestimación de la clorofila MODIS para toda la cuenca, se encontró la zona más productiva alrededor de la isla Gorgona, donde se exhibieron los valores más altos de concentración del pigmento y, aunque estas aguas son consideradas ópticamente más complejas por su cercanía a la costa y debido a la profundidad de la zona, exhibieron un mejor ajuste que las aguas oceánicas con respecto a los datos *in situ*.

PALABRAS CLAVE: clorofila α , imágenes satelitales, cuenca Pacífica colombiana, color del océano, MODIS, espectrofotometría, isla Gorgona, productividad primaria.

ABSTRACT

During years 2003, 2004 and 2005, the chlorophyll α concentration in the Colombian Pacific Basin was determined from satellital images of the ocean color for applications in oceanography, identifying zones of primary productivity. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellital sensor data were used, which were compared with *in situ* data obtained by the spectrophotometric method, resulting from correlation analysis (r) a 0.7 linear fit and underestimation of MODIS chlorophyll in the whole basin. The most productive zone was found around Gorgona Island, where the highest values of pigment concentration were exhibited, and although these waters are considered complex optically due to their proximity to the coast and the depth, they show a better adjustment than oceanic waters with respect to *in situ* data.

KEY WORDS: chlorophyll α , satellite images, Pacific Colombian Basin, ocean color, MODIS, spectrophotometric method, Gorgona Island, primary productivity.

INTRODUCCIÓN

El Área de Oceanografía Operacional del Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, tiene por objeto caracterizar la Cuenca Pacífica Colombiana, CPC, desde los puntos de vista de la Oceanografía Física, Química y Biológica, para lo cual realiza dos cruceros oceanográficos anuales sobre esta área de estudio. Dentro de los parámetros biológicos estudiados se encuentra la concentración de clorofila α , pigmento del fitoplancton marino, responsable de la actividad fotosintética. Como resultado se obtienen datos puntuales de su concentración, pero se desconoce la dinámica de su distribución y concentración espacio-temporal, debido a que las expediciones se realizan sólo dos veces por año. En consecuencia, ha sido necesario implementar un método alternativo para obtener datos de distribución y concentración de este pigmento, aprovechando las herramientas tecnológicas actuales, como son los sensores remotos del color del océano, útiles para determinar la distribución y concentración espacio-temporal de clorofila α en la CPC, a partir de imágenes satelitales.

Los sensores satelitales del color del océano captan la radiación reflejada por la superficie de éste. En la parte visible del espectro, las características espectrales de la clorofila pueden ser claramente identificadas, de ahí que la densidad de fitoplancton marino sea determinable desde plataformas satelitales gracias a su pigmentación (Lee y Carder, 2004; Ojeda y Plata, 2004; Sierk *et al.*, 2004). Esta tecnología satelital posee ciertas ventajas con respecto a los métodos experimentales, debido a su amplio cubrimiento espacial y temporal, así como por los altos niveles de sensibilidad radiométrica y espectral. Este es el caso del sensor MODIS, lanzado a bordo del satélite AQUA en mayo del 2002, el cual equipa un radiómetro de alta sensibilidad (12bits), tiene 36 bandas espectrales en longitudes de onda desde las 0.4 hasta la 14.4micras y obtiene diariamente datos del color del océano. No obstante, debido a que la radiancia total detectada por el sensor está influenciada por otras componentes además de la señal reflejada por el océano, que aunque corregida por los algoritmos que emplea el satélite generan ruido no deseado, los datos provenientes de sensores satelitales requieren un proceso de comparación para garantizar la fiabilidad de los mismos.

ÁREA DE ESTUDIO

La CPC se ubica geográficamente entre los paralelos 1° 30' hasta los 7° 10' de latitud Norte y entre 77° 40' y 82° 00' de longitud Oeste. De acuerdo con esta localización sus límites geográficos son: al N las aguas del golfo de Panamá; al E el litoral occidental de Colombia, integrado por los departamentos de Chocó, Valle, Cauca y Nariño; al S las aguas de la costa ecuatoriana y la cordillera submarina de Carnegie; y al O las aguas territoriales de Panamá y la cordillera submarina de Cocos.

Las características geomorfológicas más importantes de la CPC son: la isla Gorgona, ubicada sobre los 2° 55' y 3°00' de latitud Norte y 78° 09' y 78°14' de longitud Oeste, es una isla de origen volcánico, distante 30 km de la costa más cercana; y la isla Malpelo, también de formación volcánica, se encuentra a 3° 51' de latitud Norte y 81° 51' de longitud Oeste.

El área bajo estudio es apreciable en la Figura 1, corresponde a las estaciones biológicas de la malla de crucero realizada a bordo del buque oceanográfico ARC Providencia de la Dirección General Marítima (DIMAR), durante el crucero ERFEN XL en julio de 2005. Adicionalmente, se realizó un muestreo alrededor de las islas Gorgona y Malpelo.

METODOLOGÍA

Obtención de datos *in situ*

Durante el crucero oceanográfico se tomaron muestras de agua para el análisis del componente biológico y químico en 25 estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca (Figura 1) y en 18 estaciones alrededor de las islas Gorgona (10) y Malpelo (8). Este muestro se llevó a cabo con botellas Niskin, lanzadas a diferentes profundidades: 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 y 150 m, para la determinación de oxígeno disuelto (OD), nutrientes y clorofila α .

Previo al análisis de clorofila, las muestras de agua fueron filtradas a bordo antes de ser llevadas al laboratorio, usando un equipo con filtros de éster de celulosa de 0.45 micras. El volumen de agua filtrado fue de 1000 ml. A medida que la muestra iba siendo filtrada se adicionaron unas gotas de suspensión de carbonato de magnesio para evitar la acidificación del filtro.

La concentración de clorofila α fue

determinada usando el método de espectrofotometría visible formulado por Strickland y Parson en 1972 y modificado por el laboratorio de química del CCCP. Para efectos de este trabajo se utilizaron los datos de concentración de clorofila α obtenidos a 0 m, es decir superficial. Adicionalmente se trabajó con datos *in situ* de cruceros realizados en los años 2003 y 2004, suministrados por el Área de Oceanografía Operacional del CCCP.

Los métodos de espectrofotometría y fluorometría son a menudo los más usados para determinar concentración de clorofila α (Lorenzen, 1967; Jeffrey y Humphrey, 1975). Aunque el límite de detección del método fluorométrico depende del volumen de agua filtrado y de la sensibilidad del fluorómetro, es de cinco a diez veces más sensible que el método espectrofotométrico (Parson, 1992); sin embargo, en este trabajo se utilizó el segundo, ya que es con el que se cuenta en el laboratorio de química del CCCP. Estudios recientes muestran mejores ajustes utilizando como estimador de fitoplancton la fluorescencia de la clorofila (Stuart *et al.*, 2004; Chomko *et al.*, 2003); no obstante, debido a que la fluorescencia en el rojo (685 nm) afecta el espectro de absorción de los pigmentos fitoplanctónicos (IOCCG, 2000) para aguas costeras, donde la materia orgánica disuelta es abundante, la fluorescencia puede llegar a ser un importante contribuyente en la reflectancia.

Obtención de datos satelitales

Las imágenes del nivel 2 con resolución 1km, como archivos tipo LAC (Local Area Coverage), fueron obtenidas vía web a través de <http://seadas.gsfc.nasa.gov>. Estos archivos contienen los valores de clorofila α en mg/m^3 obtenidos mediante el algoritmo OC3 (O'Reilly *et al.*, 2000). El acondicionamiento de las imágenes se llevó a cabo con el software SeaDAS (SeaWIFS Data Analysis System) de la NASA, lo que implicó hacer corrección de la proyección, adecuar los límites de latitud y longitud, y extracción de archivos HDF (Hierarchical Data Format), de tal forma que pudieron ser leídos posteriormente por rutinas implementadas en el software Matlab de Mathworks inc.

Análisis estadístico realizado

Siguiendo a Gregg y Casey (2004), se utilizó el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS),

así como el diagrama de dispersión y el coeficiente de correlación definidos por Thiébaux (1994). El RMSE es un estadístico simple que permitió medir el grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados, el sesgo proporcionó información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, y el coeficiente de correlación determinó la linealidad de la relación entre los pares de datos.

Los datos *in situ* y MODIS fueron transformados logarítmicamente (base 10) antes de hacer la comparación estadística, debido a que la distribución natural de la clorofila en el océano es lognormal (Campbell, 1995). Siendo S los valores obtenidos del sensor satelital, I los obtenidos *in situ* y n el número de muestras, se consideró:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [\text{Log}(S) - \text{Log}(I)]^2}{n}} \times 100$$

(1)

$$BIAS = \frac{\sum [\text{Log}(S) - \text{Log}(I)]}{n} \times 100$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$$

(2)

(3)

donde,

S_{xy} es la covarianza muestral.

S_{xx} y S_{yy} son las desviaciones típicas muestrales de x y de y.

RESULTADOS

Las figuras 2 y 3 muestran la distribución y concentración de clorofila α obtenidas durante algunos días de muestreo en la CPC, a partir de las cuales se observa que los valores más altos se distribuyen sobre la zona costera y alrededor de la isla Gorgona (Figura 4), donde se encontró el valor más elevado de concentración de clorofila α , 0.92 mg/m^3 , indicador de mayor abundancia de

fitoplancton.

Igualmente, es notorio que no siempre se cuenta con datos de una estación determinada, puesto que la calidad de las imágenes depende de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio. Este fue el caso observado en la isla Malpelo, donde no se contó con datos satelitales debido a las condiciones climáticas desfavorables.

El diagrama de dispersión para el conjunto total de datos se muestra en la Figura 5. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.7, indicando buena relación lineal entre las variables. El RMSE obtenido para el conjunto de datos fue de 25%, lo que indica buen desempeño de los datos MODIS con respecto a los *in situ*, ya que no supera el RMSE del 35% requerido para obtener una mayor credibilidad en datos obtenidos de sensores satelitales (Eplee *et al.*, 2001; Hooker y McClain, 2000); por su parte, el sesgo negativo (-12 %) indicó la tendencia a subestimar el valor de la clorofila obtenida por satélite.

Adicionalmente, se aplicó la metodología descrita anteriormente al conjunto de datos obtenidos en la isla Gorgona, encontrándose la mejor relación entre los conjuntos de datos *in situ* y satelital. Los resultados se muestran en la Tabla I y el diagrama de dispersión en la Figura 6. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos a partir del sensor satelital SeaWiFS (Gregg y Casey, 2004), un sensor de color similar al MODIS, y realizados en diferentes zonas a nivel mundial que muestran un buen desempeño de los algoritmos empleados por los sensores satelitales de color del océano en el Pacífico ecuatorial, con RMSE de 16.8%, y *r* de 0.7.

DISCUSIÓN

Existen factores que influyen en la recuperación de la señal proveniente de la superficie del océano y recuperada por el sensor, entre los que se encuentran la clasificación de las aguas oceánicas y la influencia del fondo.

Análisis de aguas Caso I y Caso II

Para un análisis adecuado de los resultados obtenidos tras la comparación se debe tener en cuenta la clasificación de las aguas oceánicas propuesta por Morel y Prieur (1977) en aguas de Caso

I y aguas de Caso II, ya que no poseen las mismas propiedades ópticas y composición, siendo más complejas las de Caso II. Este tipo de aguas (Caso II) es el que se encuentra en regiones costeras y lagos, y en las cuales las variaciones en las propiedades ópticas no sólo dependen del fitoplancton, sino también de las partículas inorgánicas en suspensión y de la sustancia amarilla (materia orgánica disuelta)

A la fecha, los algoritmos se han centrado en aguas Caso I y es bien conocido que estos ya no funcionan en aguas Caso II en cuanto a determinación de clorofila (IOCCG, 2000). No obstante, aunque las aguas Caso II corresponden a una pequeña fracción del cubrimiento total del océano, cubren una importante fracción, ya que corresponden a aguas costeras con un importante significado económico, ecológico y social. Por lo anterior, se realizó una división en el conjunto de estaciones monitoreadas, siendo el punto de referencia la profundidad de la zona. De acuerdo a Gregg y Casey (2004), se agruparon como aguas de Caso I todas aquellas estaciones con profundidad mayor a 200 m, y como Caso II las menores. Para llevar a cabo esta clasificación se utilizaron los datos de profundidad por carta y por sonda de cada estación monitoreada obtenidos durante las expediciones oceanográficas. Así, la rutina desarrollada en Matlab para el análisis estadístico fue implementada en los dos conjuntos de datos, obteniendo como resultados los datos agrupados en la Tabla II. Los diagramas de dispersión se presentan en la Figura 7.

Estos resultados evidencian la diferencia existente entre los dos tipos de aguas. Los valores encontrados se encuentran por debajo del límite requerido del 35 %, aunque, contrario a la literatura, se obtuvo un mejor ajuste para aguas Caso II, donde la señal recuperada por el sensor no sólo es debida al fitoplancton.

La mayoría de estaciones clasificadas como Caso II pertenecen a la isla Gorgona, donde se obtuvo el mejor ajuste. La diferencia entre los datos obtenidos en la isla con respecto a los obtenidos en la cuenca, radica en que en la isla Gorgona el muestreo sólo se realizó durante un día y por tanto los valores obtenidos por satélite corresponden a los de la misma imagen; es decir, aunque existen factores que limitan la señal proveniente del fitoplancton y recuperada por el sensor, todos los datos cuentan con el mismo error. De otro lado, los

datos de la CPC fueron obtenidos en diferentes días y en diferentes años, lo que significa que no se puede garantizar que la calidad de las imágenes fuera la misma en todos los días de muestreo. Para ello, hay que tener en cuenta que las condiciones climáticas presentes durante un día de muestreo son diferentes durante todo el crucero.

Influencia del fondo

En aguas claras y poco profundas los sensores satelitales pueden captar la radiación proveniente del fondo. La máxima profundidad desde la cual el sensor recibe una señal significativa varía como función de la longitud de onda y de la transparencia del agua. En aguas claras el fondo es detectable hasta los 30 m, alrededor de los 490 nm (IOCCG, 2000)

La variación de la atenuación espectral con la profundidad es una herramienta clave para usar los datos del sensoramiento remoto en la determinación de batimetrías y características del fondo. De acuerdo a las mallas realizadas, las menores profundidades se obtuvieron alrededor de la isla Gorgona, siendo la menor de ellas 45 m. Otro indicador es la transparencia del agua, que en las estaciones propuestas fue determinada con un instrumento oceanográfico llamado disco Secchi. Este es un disco de 30 cm de diámetro, sujeto a un cabo medrado, pintado en dos secciones blancas y negras, que se introduce en el agua hasta perderlo de vista para conocer la transparencia de la misma. Este instrumento fue sumergido en todas las estaciones monitoreadas; para la estación menos profunda el resultado fue 7 m para negro y 10 m para blanco, indicando que las aguas eran claras. Lo anterior indica que, de acuerdo a las profundidades de las estaciones y a la transparencia del agua, se puede descartar la contribución de la reflexión en el fondo para la señal captada por el sensor.

CONCLUSIONES

- A partir de datos de concentración de clorofila α obtenida de imágenes satelitales del color del océano durante los años 2003, 2004 y 2005, se encontró que la zona más productiva de la CPC se ubica alrededor de la isla Gorgona, donde se registraron los valores más altos de concentración. Adicionalmente, al evaluar el desempeño de los

datos MODIS, a partir de análisis de correlación con respecto a datos *in situ*, se obtuvo buena relación lineal entre las variables indicadas por $r=0.7$, subestimación de la concentración de clorofila producto del MODIS, y mejor ajuste para aguas costeras con respecto a las oceánicas; por lo cual se sugiere desarrollar algoritmos locales bio-ópticos para mejorar los resultados obtenidos del conjunto de datos satelitales.

- Los altos valores encontrados alrededor de la isla Gorgona pueden ser atribuidos al 'efecto de masa', ya que en general se presenta una alta producción biológica cerca de islas o zonas ricas en nutrientes, así como también a la descarga de agua dulce proveniente de los sistemas fluviales de la zona costera sur de la CPC.

- Finalmente, para todas las estaciones monitoreadas y con base en la transparencia del agua, se descarta la contribución de la reflexión en el fondo para la señal recuperada por el sensor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la DIMAR y al CCCP por los datos suministrados para la ejecución de este trabajo.

Igualmente, agradecen a la tripulación del buque oceanográfico ARC Providencia por su colaboración durante el crucero oceanográfico ERFEN XL.

LITERATURA CITADA

Campbell, J. 1995. The lognormal distribution as a model for bio-optical variability in the sea. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C7), 13237-13254.

Chomko, R., H. Gordon, S. Marimorena y D. Siegel. 2003. Simultaneous retrieval of oceanic and atmospheric parameters for ocean color imagery by spectral optimization: a validation. *Remote sensing of environment* 84, 208-220.

Eplee, R., W. Robinson, S. Bailey, D. Clark, P. Werdell, M. Wang, R. Barnes y C. McClain. 2001. Calibration of SeaWiFS: II. Vicarious techniques. *Applied Optics*, 40(36), 6701- 6718.

Gregg, W. y N. Casey. 2004. Global and regional evaluation of the SeaWiFS data set. *Remote sensing of*

environment (93), 463-479.

Hooker, S. y C. McClain. 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data. Progress in Oceanography, 45, 427- 465.

IOCCG. 2000. Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically-complex, waters. Report number 3. International Ocean-Colour Coordinating Group.

Jeffrey, S., y G. Humphrey G. 1975. New spectrophotometric equation for determining chlorophyll a, b, c1 and c2. Biochem. Physiol. Pflanz., 167, 194-204.

Lee, Z. y K. Carder. 2004. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. Remote Sensing of Environment, 89, 361-368.

Lorenzen, C. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. Limnol. Oceanogr. 12, 343-346.

Morel, A. y L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color. Limnol. Oceanography., 22, 709-722.

Ojeda, V. y A. Plata. 2004. Multispectral tracking of phytoplankton in the Colombian Caribbean. GAYANA. International journal of biodiversity, oceanology and conservation. Tomo II. 450-455.

O'Reilly, J. y 24 co-authors. 2000. SeaWiFS Post launch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 206892, Vol. 11, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 24 pp.

Parson, T., Y. Maita y C. Lalli. 1992. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, pp 101-109.

Sierk, B., A. Bracher, A. Richter, M. Vountas, T. Dinter y J. Burrows. 2004. Determination of phytoplankton concentrations from space-borne spectroscopic measurements. GAYANA. International journal of biodiversity, oceanology and conservation. Tomo II. 532-539.

Strickland, J. y T. Parson. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fisheries research Board of Canada. 2a. Ed. Ottawa.

Stuart, V., O. Ulloa, G. Alarcón, S. Sathyendranath, H. Major, E. Head, y T. Platt. 2004. Bio-optical characteristics of phytoplankton populations in the upwelling system off the coast of Chile. Rev. Chilena Hist. Nat., 77, 87-105.

Thiébaux, H. 1994. Statistical Data Analysis for Ocean and Atmospheric Sciences. Academic Press. 247 pp.

FIGURAS Y TABLAS

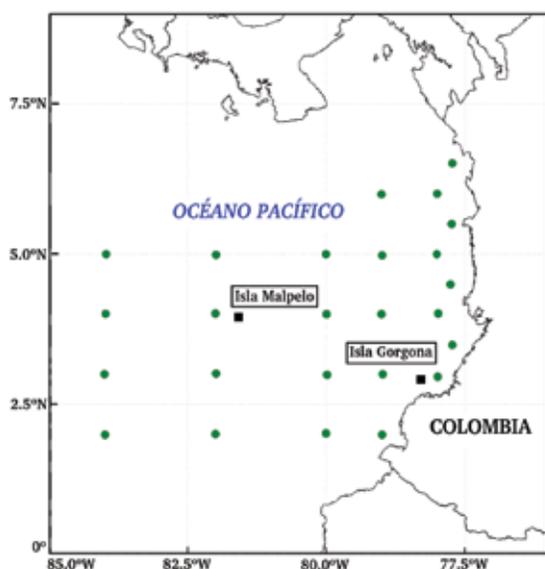


Figura 1. Malla de estaciones biológicas realizada por el buque ARC Providencia en la CPC durante julio de 2005.

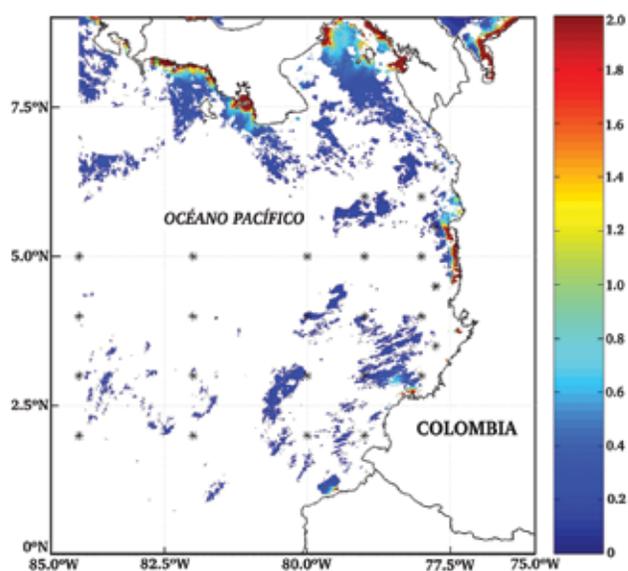


Figura 2. Clorofila α en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. (Fuente: sensor MODIS 21/07/05)

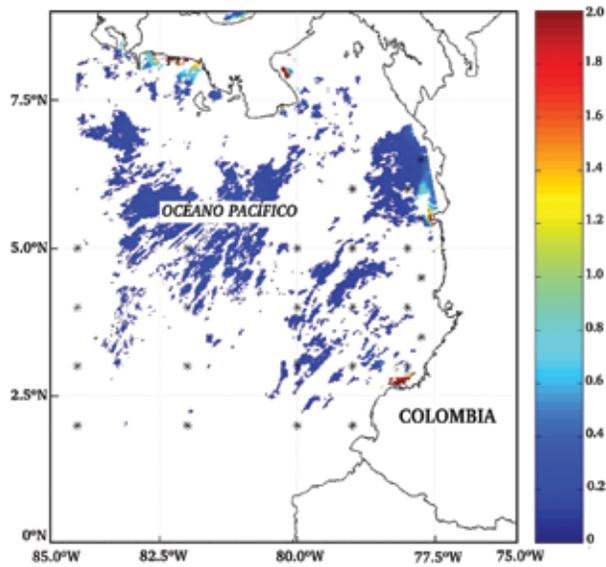


Figura 3. Clorofila α en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. (Fuente: sensor MODIS 27/07/05)

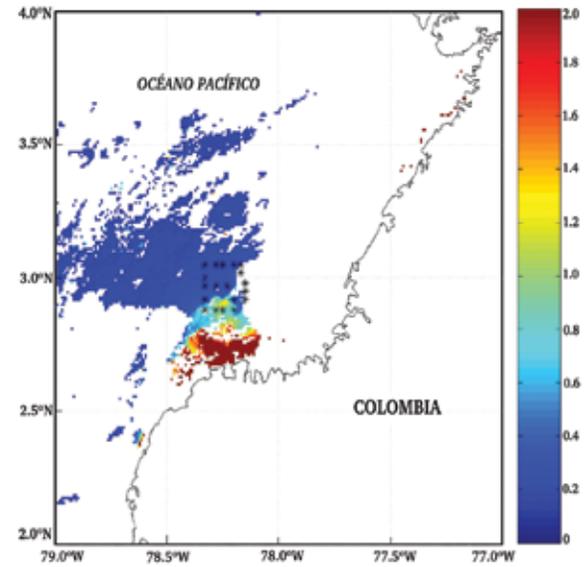


Figura 4. Clorofila α en la malla Gorgona (mg/m^3). (Fuente: sensor MODIS 10/07/05)

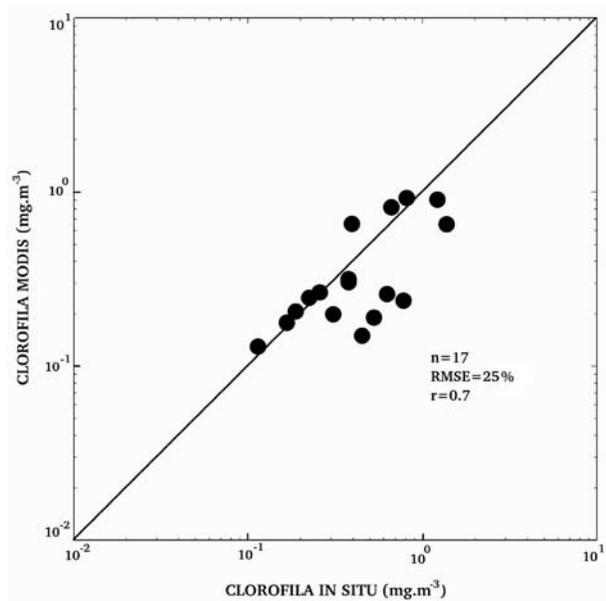


Figura 5. Diagrama de dispersión de los datos de clorofila α MODIS *in situ* para un conjunto de 17 observaciones en la CPC.

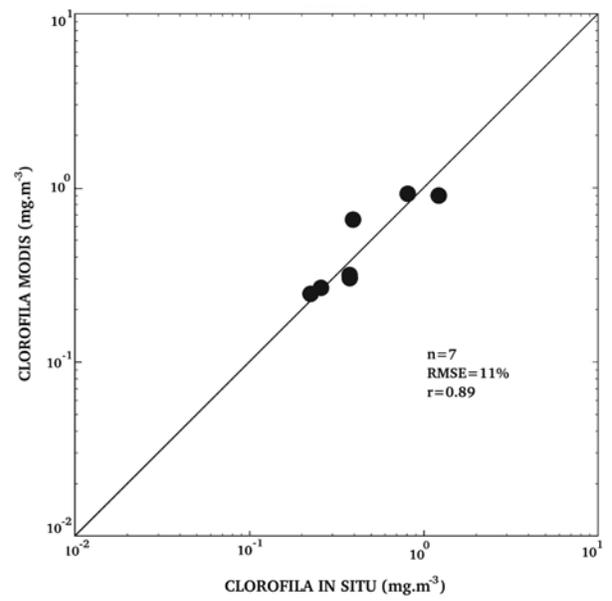


Figura 6. Diagrama de dispersión de la clorofila para la isla Gorgona.

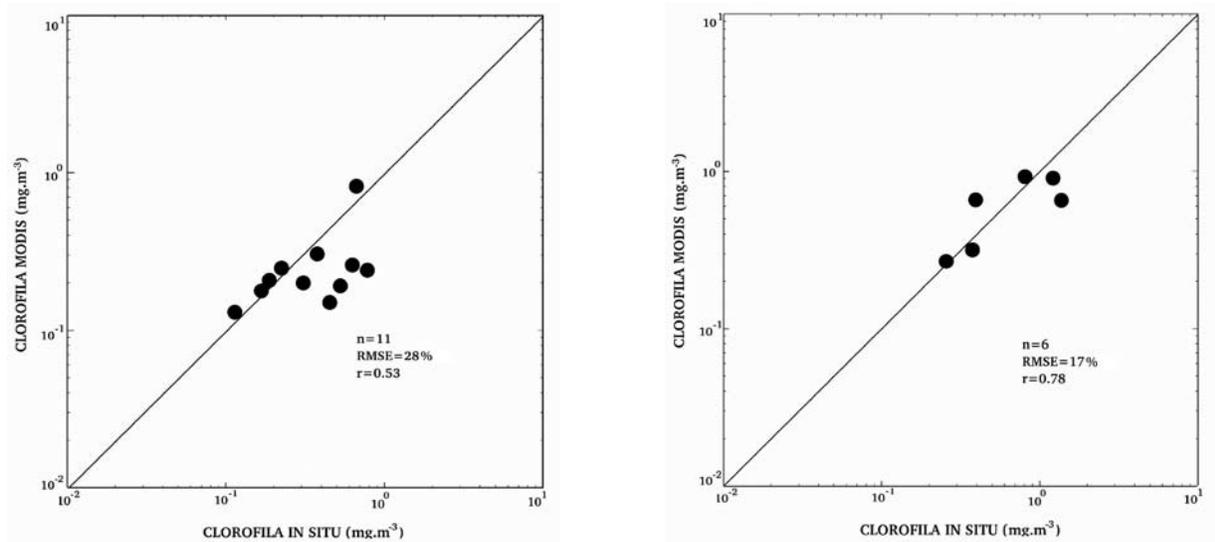


Figura 7. Diagramas de dispersión de la clorofila para aguas Caso I (a) y Caso II (b).

Tabla I. Resultados estadísticos en la Isla Gorgona, para un conjunto de 7 observaciones.

RMSE	MAE	BIAS	r
11 %	8.7 %	-0.3 %	0.89

Tabla II. Comparación de resultados estadísticos para aguas Caso I y Caso II, donde n es el número de datos.

Tipo de agua	RMSE	MAE	BIAS	r
Aguas Caso I (n=11)	28 %	21 %	-16 %	0.53
Aguas Caso II (n=6)	17 %	14 %	-4 %	0.78