

INHERENT OPTICAL PROPERTIES IN THE GULF OF CALIFORNIA
PROPIEDADES ÓPTICAS INHERENTES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

W. Scott Pegau^{1*}
J. Ronald V. Zaneveld¹
Andrew H. Barnard¹
Helmut Maske²
Saúl Álvarez-Borrego^{2,3}
Rubén Lara-Lara²
Rafael Cervantes-Duarte⁴

¹ College of Oceanic and Atmospheric Sciences
Oregon State University
Corvallis, OR 97331, USA
* E-mail: spegau@oce.orst.edu

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Apartado postal 2732
Ensenada, Baja California, México

³ Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, CP 22800, Baja California, México

⁴ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Apartado postal 592
La Paz, Baja California Sur, México

Recibido en enero de 1999; aceptado en junio de 1999

ABSTRACT

In order to be able to invert optical remote sensing data, it is necessary to understand the absorption, scattering and attenuation spectra. In this paper we present a study of the vertical distribution and spectra of the inherent optical properties by the particulate and dissolved materials in the Gulf of California. Most of the optical properties in the gulf are dominated by phytoplankton and their by-products (Case I waters). Only in the extreme northwestern region of the gulf were the optical properties dominated by inorganic materials. Typical spectra for the various components are presented. The distribution of the components and their relative contribution to the total optical properties are discussed.

Key words: inherent optical properties, absorption, scattering, beam attenuation.

RESUMEN

Para poder invertir los datos de sensores ópticos remotos, es necesario conocer los espectros de absorción, dispersión y atenuación. En este trabajo presentamos la distribución vertical, así como los espectros de las propiedades ópticas inherentes del material particulado y disuelto en el Golfo de California. La mayoría de las propiedades ópticas del golfo son dominadas por el fitoplancton y sus derivados (aguas de Caso I). Solamente en la parte extrema del noroeste del golfo fueron dominadas las propiedades ópticas por material inorgánico. Se presentan los espectros típicos de los diferentes componentes y se discute la distribución de los componentes y sus contribuciones relativas a las propiedades ópticas totales.

Palabras clave: propiedades ópticas inherentes, absorción, dispersión, atenuación de haz.

INTRODUCTION

Ocean color satellite measurements have shown that the Gulf of California has many biogeographic regions (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). The region is relatively cloud-free, allowing regular ocean color satellite measurements to be obtained within the region. Because of this, the gulf region is an excellent location for ocean color remote sensing studies. In order to invert satellite measurements of ocean color into useful products, such as productivity, suspended sediment concentration and harmful algal bloom locations, the spatial and temporal characteristics of the biological and optical properties in this region must be understood.

We are participating in an internationally coordinated measurement program to study the biological and optical properties in the Gulf of California. The collaborating institutions are: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Universidad de Sonora, San Diego State University and Oregon State University. Measurements collected in this program include the inherent optical properties (IOP), such as the spectral absorption, scattering and beam attenuation coefficients. Additional measurements include the upwelling radiance, downwelling irradiance, pigment type and concentration, and productivity. The intent of this project is to provide a time series study of biological variability in the Gulf of California and

INTRODUCCIÓN

Las mediciones de satélite del color del océano han mostrado que el Golfo de California presenta muchas regiones biogeográficas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). Hay poca nubosidad en la región, lo que permite obtener de forma regular mediciones de satélite del color del océano dentro de ella; por tanto, el golfo se considera una localidad ideal para estudios del color del océano con base en sensores remotos. Para poder invertir las mediciones de satélite del color del océano en resultados útiles, tales como productividad, concentración de sedimento suspendido y localidades con afloramientos de algas dañinas, es necesario conocer las características espaciales y temporales de las propiedades biológicas y ópticas de la región.

Estamos participando en un programa internacional de mediciones para estudiar las propiedades biológicas y ópticas del Golfo de California. Las instituciones que colaboran son el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, la Universidad de Sonora, San Diego State University y Oregon State University. Las mediciones obtenidas en este programa incluyen las propiedades ópticas inherentes (POI), tales como los coeficientes de absorción espectral, dispersión y atenuación de haz, así como mediciones de la radiancia ascendente, irradiancia descendente, el tipo y concentración de pigmento y productividad. El objetivo de este trabajo es

to provide calibration and validation data for ocean color satellites. In this paper we will discuss the nature and distribution of the IOP.

The Coastal Zone Color Scanner demonstrated the utility of optical remote sensing to provide estimates of the near-surface chlorophyll levels. The biogeographic regions described by Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) were based on measurements from that satellite. While surface chlorophyll concentrations provide some insight into the biological processes in a region, it is not a product that can be used to address all scientific questions, such as vertically integrated productivity. It is desirable to use the satellite measurements to estimate primary productivity or to determine the quantity of other materials within the water. The new ocean color satellites, such as SeaWiFS, have increased spectral resolution and have the capability to provide products such as colored dissolved organic material and sediment concentration. By studying the optical properties of the water, we hope to provide the information necessary to constrain inversion algorithms designed to determine the optical constituents. The separation of the optical signal to the contributions by the individual components cannot be accomplished using the single wavelength transmissometer, which past studies of the detailed vertical structure of IOP have been limited to (e.g., Kiefer and Austin, 1974). Profiles of optical properties are desirable because they provide a level of understanding of the vertical distribution of materials that cannot be achieved from traditional bottle sampling (e.g., Kiefer and Soohoo, 1982). The multi-spectral, multi-instrument approach that we describe allows us to determine the vertical distribution of the IOP and to separate those properties to the contributions by dissolved and particulate materials. Extensive sampling over a four-year period allows us to begin to understand the horizontal distribution of the optical properties. The distribution information can then be used to develop regional and seasonal models of optical properties appropriate for inclusion in primary productivity and other bio-optical algorithms.

proporcionar una serie de tiempo de la variabilidad biológica dentro del Golfo de California, así como datos de calibración y validación para satélites del color del océano. En este trabajo discutiremos sobre la naturaleza y distribución de las POI.

El Coastal Zone Color Scanner ha demostrado la utilidad de sensores ópticos remotos para estimar los niveles de clorofila cercanos a la superficie. Las regiones biogeográficas descritas por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) se basaron en las mediciones de este satélite. Aunque las concentraciones superficiales de clorofila dan una idea de los procesos biológicos de la región, no se pueden usar para explicar toda conjetura científica, como por ejemplo la productividad integrada verticalmente. Es conveniente usar las mediciones de satélite para estimar la productividad primaria o para cuantificar los demás materiales dentro del agua. Los nuevos satélites del color del océano, como SeaWiFS, tienen mejor resolución espectral, así como la capacidad de proveer información del material orgánico disuelto de color y la concentración del sedimento. A través del estudio de las propiedades ópticas del agua, esperamos proporcionar la información necesaria para constreñir algoritmos de inversión diseñados para determinar los componentes ópticos. La separación de la señal óptica de las contribuciones por parte de los componentes individuales no se puede lograr con el transmisor de una sola longitud de onda, al cual se han limitado estudios anteriores de la estructura vertical detallada de las POI (e.g., Kiefer y Austin, 1974). Los perfiles de las propiedades ópticas son muy útiles porque proveen un nivel de conocimiento de la distribución vertical de los materiales que no se puede lograr con muestreos tradicionales de botella (e.g., Kiefer y Soohoo, 1982). La aproximación multiespectral y multiinstrumental que aquí se describe, permite determinar la distribución vertical de las POI, así como separar estas propiedades de las contribuciones por material disuelto y particulado. El muestreo extensivo durante un periodo de cuatro años nos permite empezar a comprender la distribución vertical de las propiedades ópticas.

In this paper we examine the IOP within the Gulf of California. We compare the spatial distribution and spectral characteristics of optical properties obtained on four cruises in the Gulf of California. We also examine the relative contribution to the various IOP by dissolved and particulate materials. The intent is to provide the observations necessary to constrain inversion algorithms and develop regional models of IOP.

METHODS

Four research cruises were performed over the past four years: November 28 to December 5, 1995; October 30 to November 8, 1996; October 16 to 29, 1997; and March 6 to 16, 1998. Sampling was concentrated in the Guaymas Basin, between 27° and 28.5°N (fig. 1). Much of the sampling was conducted in two regions: a small grid to the west of Guaymas and a larger grid centered near Guaymas, crossing the central Gulf of California. Additional stations selected to study specific processes in the region make the large grid difficult to discern in the figure. During the 1998 cruise, we also sampled along and across the shelf in the northern gulf region.

During each of the four cruises we collected measurements of the IOP, which include the spectral absorption (*a*), scattering (*b*) and beam attenuation coefficients (*c*, the sum of absorption and scattering coefficients). These measurements were made using Oregon State University's Slow Descent Rate Optical Platform (SlowDROP), which is a free-falling platform with optical and hydrographical instrumentation. Included on the package was a SeaBird SBE-25 CTD for measuring physical parameters (temperature and salinity) and two WETLabs ac-9 (nine wavelength absorption and attenuation meters) for measuring particulate and dissolved component optical parameters. The wavelength intervals measured with the ac-9s that were used are centered on 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 and 715 nm. The data streams are merged at the nominal 6 Hz sampling rate of the ac-9. To

Esta información de la distribución servirá para desarrollar modelos regionales y estacionales de las propiedades ópticas que se podrán incluir en la productividad primaria y otros algoritmos bioópticos.

En este trabajo examinamos las POI dentro del Golfo de California. Comparamos la distribución espacial y las características espectrales de las propiedades ópticas obtenidas durante cuatro cruceros en el Golfo de California. También examinamos la contribución relativa del material disuelto y particulado a varias POI. El objetivo es proporcionar las observaciones necesarias para constreñir algoritmos de inversión y desarrollar modelos regionales de las POI.

MÉTODOS

Se realizaron cuatro cruceros de investigación durante los pasados cuatro años: del 28 de noviembre al 5 de diciembre de 1995, del 30 de octubre al 8 de noviembre de 1996, del 16 al 29 de octubre de 1997, y del 6 al 16 de marzo de 1998. Se concentraron los muestreos en la Cuenca de Guaymas, entre 27° y 28.5°N (fig. 1). La mayoría de los muestreos se realizaron en dos regiones, una cuadrícula pequeña al oeste de Guaymas y una más grande centrada frente a Guaymas que atraviesa la parte central del Golfo de California. La adición de otras estaciones establecidas para estudiar procesos específicos de la región dificulta la percepción de la cuadrícula grande en la figura. Durante el crucero de 1998, también se realizaron muestreos a lo largo y a través de la plataforma en la región del norte del golfo.

Se tomaron mediciones de las POI durante cada uno de los cuatro cruceros, que incluyen los coeficientes de absorción espectral (*a*), dispersión (*b*) y atenuación de haz (*c*, la suma de los coeficientes de absorción y dispersión). Se realizaron estas mediciones con el Slow Descent Rate Optical Platform (SlowDROP) de la Oregon State University, el cual es una plataforma de caída libre con instrumentación óptica e hidrográfica. También cuenta con un CTD SeaBird SBE-25 para medir los parámetros físicos (temperatura y

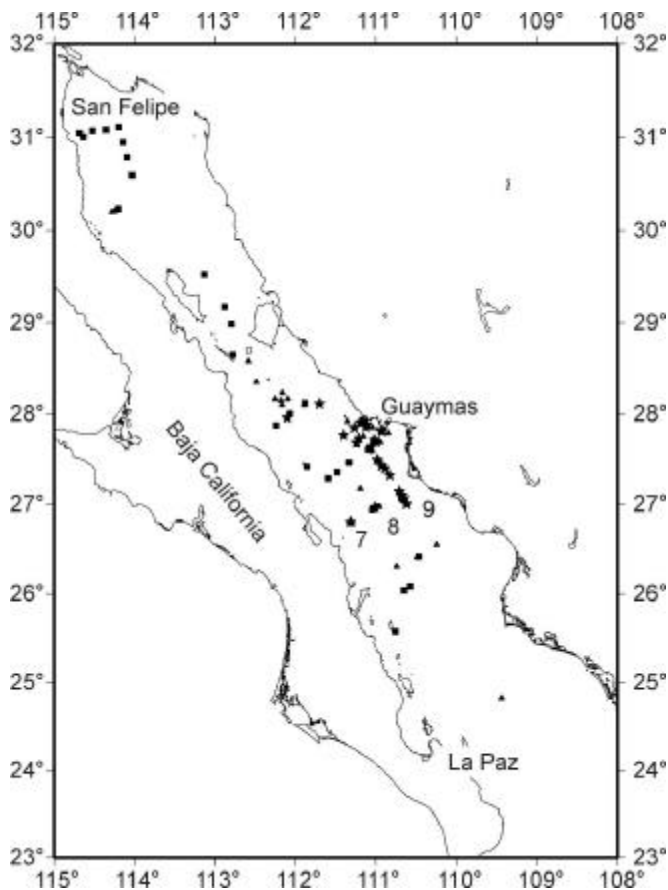


Figure 1. Map of the Gulf of California with sampling locations. The circles denote sampling locations during the 1995 cruise, the stars the 1996 cruise, the triangles the 1997 cruise, and the squares the spring 1998 cruise. Stations 7, 8 and 9 are identified because these locations were sampled during each of the four cruises.

Figura 1. Mapa del Golfo de California con las localidades de muestreo. Los círculos denotan las localidades de muestreo del crucero de 1995; las estrellas, el crucero de 1996; los triángulos, el crucero de 1997; y los cuadrados, el crucero de primavera de 1998. Se identifican las estaciones 7, 8 y 9 porque éstas se muestrearon en cada uno de los cuatro cruceros.

determine the absorption coefficient of the dissolved component (a_g), a 0.2- μm pore-size filter was attached to the input of one of the ac-9 units. The ac-9s were calibrated, using optically pure water from a Barnstead® Nanopure deionizer, several times during each experiment to ensure accurate measurements.

salinidad) y dos WETLabs ac-9 (medidor de absorción y atenuación de nueve longitudes de onda) para medir los parámetros ópticos del componente particulado y disuelto. Los intervalos de longitud de onda medidos con los ac-9 se centran en 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 y 715 nm. Las series de datos se unen en la razón

Processing of the ac-9 was conducted in accordance with the manufacturer's protocols (Moore *et al.*, 1997). This includes corrections for temperature and salinity effects. Scattering corrections were applied to the unfiltered ac-9. The filtered ac-9 absorption data were subtracted from the unfiltered ac-9 absorption data to determine the absorption coefficient of the particulate component (a_p). The absorption and attenuation coefficients of water were added to the unfiltered ac-9 data to determine the total absorption (a or a_t) and attenuation (c or c_t) coefficients. The difference between the total attenuation and absorption coefficients gives the scattering coefficient (b or b_s). The full vertical resolution data were then averaged over 1-m intervals.

RESULTS

Spectral characteristics

Absorption and scattering spectra of particulate and dissolved materials are used as basis vectors for inversion of remote sensing data (Roesler and Perry, 1995; Lee *et al.*, 1996). One purpose of our investigation is to determine the appropriate spectra to be used in the Gulf of California for satellite inversion schemes and how these spectra change. The spectral IOP data collected in the upper 20 m at all stations were normalized by the value at 488 nm to look for differences in spectral shape among the four cruises (fig. 2). The upper 20 m was selected as it is the depth interval from which most of the remote sensing signal originates. The normalized data were then averaged to provide an average spectrum for each cruise. Problems with the long wavelength channels of the ac-9s were encountered during the 1998 cruise and we have not included that data. The 1998 cruise has been separated into two portions: the c2 data are from the stations in the northern gulf, where suspended sediments dominated the optical signal, and the c1 data are from all other stations.

The spectral shape of the absorption by dissolved materials is relatively constant through

de muestreo nominal de 6 Hz del ac-9. Para determinar el coeficiente de absorción del componente disuelto (a_g), se conectó un filtro con tamaño de poro de 0.2 μm a la entrada de una de las unidades ac-9. Se calibraron los ac-9 varias veces durante cada experimento con agua ópticamente purificada con un desionizador Barnstead® Nanopure para asegurar mediciones exactas.

El procesamiento de los ac-9 se llevó a cabo de acuerdo con las instrucciones del fabricante (Moore *et al.*, 1997); esto incluye correcciones para los efectos de temperatura y salinidad. Se aplicaron correcciones de dispersión al ac-9 sin filtro. Los datos de absorción del ac-9 con filtro se restaron de los datos de absorción del ac-9 sin filtro para determinar el coeficiente de absorción del componente particulado (a_p). Los coeficientes de absorción y atenuación del agua se sumaron a los datos del ac-9 sin filtro para determinar los coeficientes de absorción total (a o a_t) y de atenuación total (c o c_t). La diferencia entre los coeficientes de atenuación total y absorción total da el coeficiente de dispersión (b o b_s). Todos los datos de resolución vertical se promediaron con intervalos de 1 m.

RESULTADOS

Características espectrales

Los espectros de absorción y de dispersión del material particulado y disuelto se utilizan como vectores base para la inversión de los datos de sensores remotos (Roesler y Perry, 1995; Lee *et al.*, 1996). Uno de los propósitos de este estudio es determinar los espectros apropiados que deberán utilizarse en el Golfo de California para esquemas de inversión de satélite y determinar como cambian estos espectros. Los datos espectrales de las POI de los primeros 20 m en todas las estaciones se normalizaron con el valor de 488 nm para detectar las diferencias en la forma espectral entre los cuatro cruceros (fig. 2). Se seleccionaron los primeros 20 m, ya que la mayoría de las señales de los sensores remotos se originan en este intervalo de profundidad. Los datos normalizados

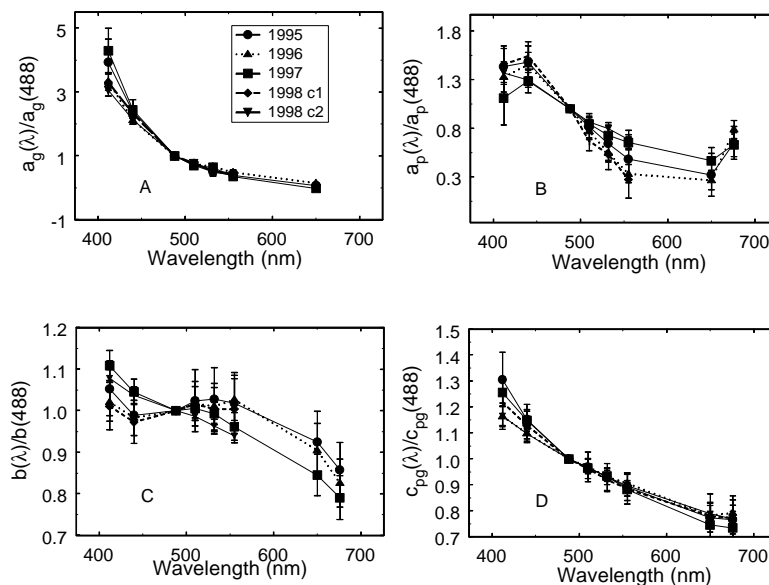


Figure 2. The normalized spectral shape of the absorption by dissolved materials (A), particulate materials (B), the scattering coefficient (C), and the beam attenuation coefficient with the signal from water removed (D). The standard deviation error bars are provided.

Figura 2. La forma espectral normalizada de la absorción del material disuelto (A), material particulado (B), el coeficiente de dispersión (C) y el coeficiente de atenuación de haz con la señal del agua removido (D). Se presentan las barras de error de la desviación estándar.

all of the cruises. Some differences can be seen at 412 nm (fig. 2), but the differences are not outside the error limits based on the measurement accuracy. Greater differences between cruises are observed in the particulate properties. The absorption spectra of the particulate material are similar during the 1995, 1996 and 1998-c1 data sets. The decrease in absorption at 412 nm and increase at 676 nm are indicative of phytoplankton dominating the particulate component. In 1997, the absorption spectrum remains dominated by phytoplankton; however, the spectrum is flatter, signifying a change in pigment composition or size distribution. The 1998-c2 absorption spectrum increases nearly linearly with decreasing wavelength, indicating that sediments were the dominant particulate materials. The data

se promediaron para obtener el espectro promedio para cada crucero. Se presentaron problemas en los canales de longitud de onda larga de los ac-9 durante el crucero de 1998, por lo que no se incluyó esta información. Se dividió el crucero de 1998 en dos partes: los datos c2 provienen de las estaciones del norte del golfo, donde los sedimentos suspendidos dominaron la señal óptica, y los datos c1 provienen de las demás estaciones.

La forma espectral de la absorción del material disuelto es relativamente constante durante todos los cruceros. Se pueden apreciar diferencias a 412 nm (fig. 2), pero las diferencias están dentro de los límites de error según la precisión de las mediciones. Las propiedades particuladas presentan mayor diferencia entre cruceros. Los espectros de absorción del material

of the scattering spectra show similar differences between cruises, with the 1997 and 1998-c2 spectra being more steeply sloped than the other cruises. The data of the beam attenuation spectra were similar for each of the cruises; the differences observed at 412 and 440 nm are caused by changes in the relative contribution of the absorption by dissolved materials a_g to the scattering and absorption by particles (b_t and a_p) to the beam attenuation. The absorption coefficient of dissolved materials increases rapidly towards shorter wavelengths, thus changes in a_g are most evident in the attenuation coefficient at the shorter wavelengths. The two cases where the particulate loads were high (1996 and 1998-c2) have nearly identical attenuation spectra even though the type of particulate materials were different in the two cases (phytoplankton in 1996 and sediments in 1998-c2).

At greater depths (>100 m), the particulate absorption and scattering spectra change as phytoplankton is no longer an important component of the particulate material and detritus becomes the dominant material. The beam attenuation by particulate materials in the deep water has a nearly constant spectral shape that is similar to the beam attenuation at the surface in 1996. The absorption by dissolved materials increases slightly with depth and has the same spectral shape as the surface water.

Spatial characteristics

The Gulf of California can be divided into several biogeochemical regions based on a variety of factors, as discussed in Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994). Our sampling has been concentrated in the Guaymas Basin, with some sampling in the northern gulf and a single station near the mouth of the gulf.

The northern gulf is of interest because it is shallow and strong tidal currents keep a large number of particles in suspension. The particles give the water a "milky" appearance that can be seen from a ship or in the true-color imagery of

particulado son similares en los conjuntos de datos de 1995, 1996 y 1998-c1. El descenso de la absorción a 412 nm e incremento a 676 nm indican que el fitoplancton dominó el componente particulado. Durante 1997, el espectro de absorción sigue dominado por el fitoplancton; sin embargo, el espectro es más aplanado, lo que indica un cambio en la composición del pigmento o en la distribución de tamaño. El espectro de absorción de 1998-c2 incrementa casi linealmente con la decreciente longitud de onda, lo que indica que los sedimentos fueron el material particulado dominante. Los datos de los espectros de dispersión muestran diferencias similares entre los cruceros; los espectros de 1997 y 1998-c2 son más empinados que los de los otros cruceros. Los datos de los espectros de la atenuación de haz fueron similares en todos los cruceros; las diferencias observadas a 412 y 440 nm se pueden explicar por los cambios en la contribución relativa de la absorción del material disuelto a_g a la dispersión y la absorción de las partículas (b_t y a_p) a la atenuación de haz. El coeficiente de absorción del material disuelto incrementa rápidamente hacia las longitudes de onda más cortas, por lo que los cambios en a_g son más evidentes en el coeficiente de atenuación en las longitudes de onda más cortas. Los dos casos en donde las cargas de partículas fueron altas (1996 y 1998-c2) presentan espectros de atenuación casi idénticos, a pesar de que el tipo de material particulado fue diferente en los dos casos (fitoplancton en 1996 y sedimentos en 1998-c2).

A mayores profundidades (>100 m), cambian los espectros de absorción y de dispersión del material particulado, debido a que el fitoplancton ya no es un componente importante del material particulado y el detrito pasa a ser el material dominante. La atenuación de haz por el material particulado en el agua profunda presenta una forma espectral casi constante, similar a la atenuación de haz en la superficie en 1996. La absorción por el material disuelto incrementa ligeramente con la profundidad y tiene la misma forma espectral que la del agua superficial.

the area. In 1998, a transect of the northern gulf was performed, consisting of four stations along the axis of the gulf and three stations across the shelf into San Felipe. These stations were numbered 24 to 27 traveling northwest and 28 to 30 towards shore. The temperature and salinity records show that the furthest inshore station (30) has relatively warm, fresher water near the surface (fig. 3). There is an increase in the absorption by the dissolved component (a_g) within the fresher layer. The lower absorption by dissolved materials and lower salinity observed at station 25 suggests that station 25 was located in a different water mass than the other stations in the north-south portion of the transect. The lower a_g levels at station 25 were consistent with values observed elsewhere in the basin north of the island region. An increase in all of the optical parameters is observed towards the shore. The magnitude of a_g increased approximately 40%, whereas the absorption and scattering by particulate matter shows a nearly eight-fold increase in magnitude. The absorption and scattering levels also increase towards the bottom at the shallower stations. The higher particle loading also increases the single scattering coefficient ($\omega_o = b/c$) by reducing the relative importance of absorption by dissolved material and water. The single scattering albedo at 440 nm in the region increased from ~ 0.67 to ~ 0.87 moving from the offshore to inshore stations. The higher levels of scattering unrelated to chlorophyll concentration make this site a good location for validation of Case II inversion algorithms.

Most of our sampling has been concentrated in the Guaymas Basin, in the central portion of the Gulf of California (fig. 1). One transect line consisting of stations 7, 8 and 9 was sampled during all four cruises. The absorption by particles near the surface is relatively constant at the mid-gulf station (8) and more variable near the coasts (fig. 4). The high a_p values observed in 1996 were caused by a large bloom in the eastern gulf that extended offshore. Below 50 m, the absorption by particles decreased to low levels

Características espaciales

Se puede dividir el Golfo de California en varias regiones biogeoquímicas con base en varios factores descritos por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994). Nuestros muestreos se concentraron en la Cuenca de Guaymas, con algunas estaciones en el norte del golfo y una sola estación cerca de la boca del golfo.

La zona del norte del golfo es de particular interés porque es somera y las corrientes de marea fuertes mantienen un gran número de partículas en suspensión. Las partículas le dan una apariencia "lechosa" al agua que puede apreciarse desde un barco o en las imágenes de color verdadero del área. En 1998, se llevó a cabo un transecto del norte del golfo que consistió de cuatro estaciones a lo largo del eje del golfo y tres estaciones que atravesaron la plataforma hacia San Felipe. Estas estaciones se numeraron del 24 al 27 en dirección noroeste y del 28 al 30 hacia la costa. Los registros de la temperatura y de la salinidad muestran que la estación más cercana a la costa (30) tiene agua menos salina y relativamente cálida cerca de la superficie (fig. 3). Se incrementa la absorción por el componente disuelto (a_g) dentro de la capa menos salina. La menor absorción por material disuelto y la menor salinidad en la estación 25 indican que ésta se encontraba dentro de una masa de agua diferente a las demás estaciones en la porción norte-sur del transecto. Los niveles menores de a_g en la estación 25 fueron consistentes con los valores observados en las otras localidades de la cuenca al norte de las islas. Se observa un incremento en todos los parámetros ópticos hacia la costa. La magnitud de a_g incrementó aproximadamente en un 40%, mientras que la absorción y dispersión del material particulado muestra un incremento en magnitud de casi ocho veces. Los niveles de absorción y de dispersión también aumentan hacia el fondo en las estaciones más someras. La mayor carga de partículas también aumenta el coeficiente de una dispersión ($\omega_o = b/c$), ya que reduce la importancia relativa de la absorción del material disuelto y agua. El

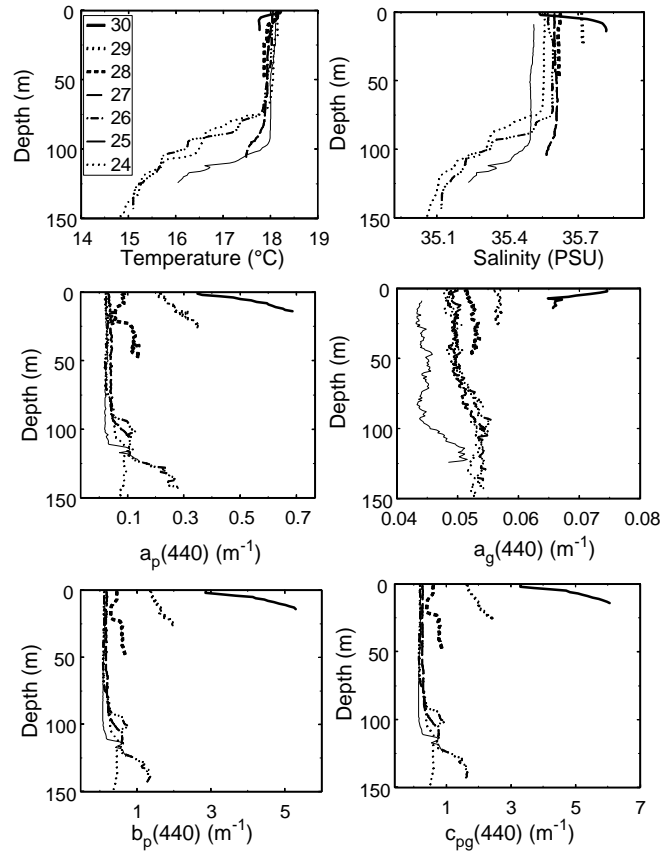


Figure 3. Hydrographic and optical properties in the northern Gulf of California. The decreased salinity and increased absorption by dissolved materials are indicative of terrestrial runoff that contributed to the optical properties in this region. Station 25 exhibited lower absorption by the dissolved component and salinity than the other offshore stations.

Figura 3. Propiedades hidrográficas y ópticas en el norte del Golfo de California. La menor salinidad y mayor absorción del material disuelto indican escurrimiento terrestre que contribuyó a las propiedades ópticas en esa región. La estación 25 mostró menor absorción del componente disuelto y salinidad que las demás estaciones lejanas de la costa.

that are similar at all stations. The vertical distributions of the scattering and beam attenuation coefficients are similar to the absorption coefficient of particulates. In general, we find a surface maximum in particles that extends to approximately 50 m depth. There are exceptions to this finding: a subsurface maximum was observed

albedo de una dispersión a 440 nm en la región aumentó de ~ 0.67 a ~ 0.87 , de las estaciones más lejanas de la costa hacia las más cercanas. Los niveles altos de dispersión no relacionados con la concentración de clorofila hacen que este lugar sea bueno para validar algoritmos de inversión de Caso II.

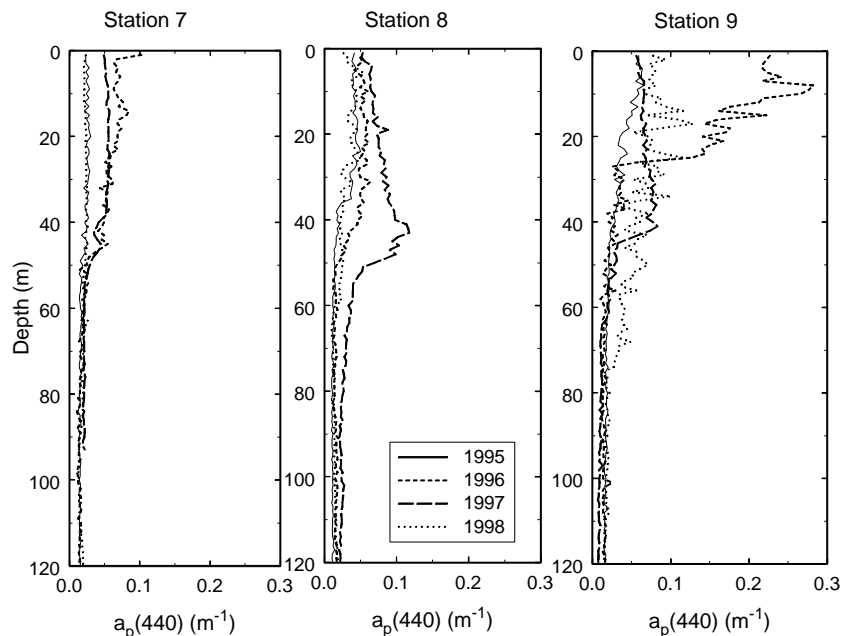


Figure 4. The absorption coefficient of particulate material at three stations across the Gulf of California is presented. The variability at the surface is largest near the coasts. The large values observed in 1996 at station 9 are probably due to an upwelling-driven bloom that extended out into our sampling region.

Figura 4. Se presenta el coeficiente de absorción del material particulado en tres estaciones a lo ancho del Golfo de California. La variabilidad superficial es mayor cerca de las costas. Los valores altos observados en 1996 en la estación 9 probablemente se deben a un afloramiento relacionado con surgencia que se extendió a nuestro área de muestreo.

in 1997 in the central portion of the gulf and in 1996 the upwelling bloom was confined to the upper 25 m.

The absorption by dissolved materials showed variability among stations similar to that of absorption by particles (fig. 5). At station 8, surface $a_g(440)$ values ranged between 0.03 and 0.05 m^{-1} . Nearer to the coast, the $a_g(440)$ values were occasionally higher and ranged from 0.025 to 0.07 m^{-1} . The value of $a_g(440)$ was nearly constant at depths >90 m, reaching a value near 0.055 m^{-1} . The lower values occasionally observed at the surface may be caused by photo-oxidation of the material in the surface layer. An

Casi todos los muestreos se realizaron en la Cuenca de Guaymas, en la parte central del Golfo de California (fig. 1). Se realizaron muestreos durante los cuatro cruceros en una línea de transecto que consiste de las estaciones 7, 8 y 9. La absorción por partículas cerca de la superficie es relativamente constante en la estación en el centro del golfo (8) y más variable cerca de la costa (fig. 4). Los valores altos de a_p observados en 1996 se debieron a un afloramiento grande en la parte este del golfo que se extendió mar adentro. Por debajo de los 50 m de profundidad, la absorción por partículas disminuye a niveles bajos que son similares en todas las estaciones. Las distribuciones verticales de los coeficientes de dispersión

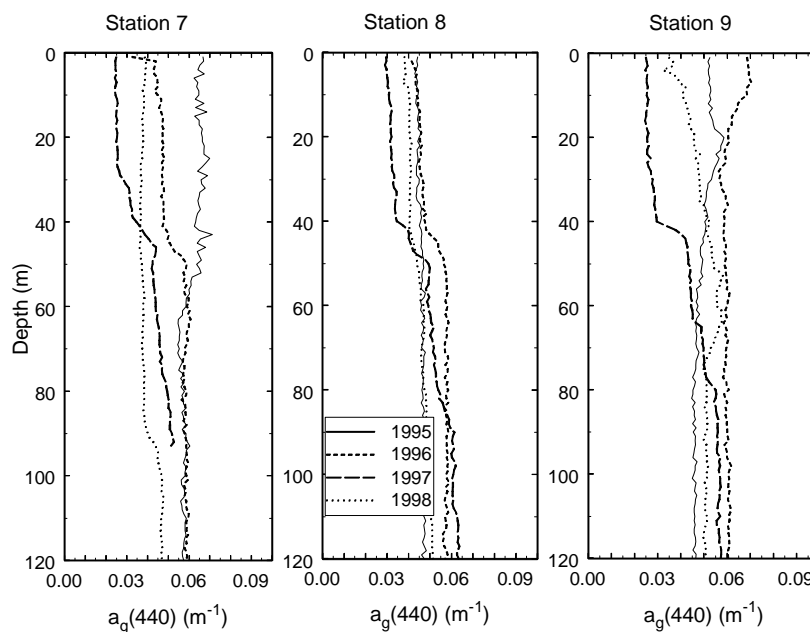


Figure 5. The absorption coefficient of dissolved material for the same stations indicated in figure 4.
Figura 5. El coeficiente de absorción de material disuelto para las mismas estaciones que se presentan en la figura 4.

increase in a_g occurs at the base of the mixed layer and the sharpness of the increase in a_g is related to the density gradient at the top of the pycnocline. The larger the density gradient the sharper the increase in a_g . The deep water acts as a source of labile organic material to the surface water. In the surface water, photo-oxidation breaks the organic compounds, reducing the a_g values. The stronger the density gradient the less flux of deep water to the surface occurs and the sharper the gradient in a_g becomes.

Composition

The relative contribution of water, dissolved materials and particulate material to the optical properties is dependent on wavelength, depth and particulate loading. As we have already discussed, the spectral shape of the beam attenuation

and attenuation of haz son similares a la del coeficiente de absorción de partículas. En general, se observa un máximo superficial de partículas que se extiende hasta aproximadamente 50 m de profundidad; sin embargo, hay excepciones: se observó un máximo subsuperficial en 1997 en la parte central del golfo y, en 1996, el afloramiento por surgencia fue confinado a los 25 m superiores.

La absorción por material disuelto mostró variabilidad entre las estaciones, similar a la de la absorción por partículas (fig. 5). En la estación 8, los valores superficiales de $a_g(440)$ variaron de 0.03 a 0.05 m^{-1} . Más cerca de la costa, los valores de $a_g(440)$ fueron ocasionalmente mayores y variaron de 0.025 a 0.07 m^{-1} . El valor de $a_g(440)$ fue casi constante a profundidades >90 m, con un valor de casi 0.055 m^{-1} . Los valores bajos observados ocasionalmente en la superficie pueden deberse a la fotooxidación del material en la capa

coefficient is dependent on the relative contributions of dissolved and particulate materials. If we are to constrain models that determine the IOP of various components from remote sensing reflectance, it is useful to have a general understanding of the importance of the contributions of the different components to the optical properties. Since the beam attenuation coefficient is the sum of the scattering and absorption coefficients of the different components, it is useful to look at how those components determine the beam attenuation coefficient. An example of the relative contributions for station 8 is provided in figure 6, which is typical of data gathered in these cruises. The data are presented to provide a general understanding of the relative contribution to the optical properties by the various components. The wavelengths presented in figure 6 are two wavelengths that many ocean color algorithms depend on.

The absorption coefficient of pure water increases with increasing wavelength greater than 440 nm. As seen in figure 6, at longer wavelengths the relative contribution of the absorption coefficient of water to the beam attenuation coefficient becomes greater. At the wavelengths shown, the scattering by particles is the largest portion of the attenuation coefficient in the surface waters. Below the particle maximum, the absorption coefficients of dissolved materials and water become the largest portion of the beam attenuation coefficient at 440 and 555 nm, respectively. Near the surface, the absorption coefficients of dissolved and particulate materials provide nearly equal contributions to the beam attenuation coefficient at both wavelengths.

DISCUSSION

Optical regimes in the ocean are often described as belonging to either Case I or Case II (Morel and Prier, 1977). The optical properties of Case I waters are dominated by phytoplankton and their by-products. We found that most of the gulf exhibited Case I characteristics. An exception to this was the extreme northwestern portion

superficial. El a_g aumenta en la base de la capa de mezcla y la pendiente de este incremento se relaciona con el gradiente de densidad en la parte superior de la pycnoclina. Entre más grande sea el gradiente de la densidad, más abrupto será el incremento de a_g . El agua profunda actúa como fuente de materia orgánica lábil para el agua superficial. En el agua superficial, la foto-oxidación rompe los compuestos orgánicos y reduce los valores de a_g . Conforme aumenta el gradiente de densidad, disminuirá el flujo de agua profunda hacia la superficie y más empinada será el gradiente de a_g .

Composición

La contribución relativa del agua, del material disuelto y del material particulado a las propiedades ópticas depende de la longitud de onda, profundidad y carga de partículas. Como hemos visto, la forma espectral del coeficiente de atenuación de haz está en función de las contribuciones relativas del material disuelto y particulado. Si se van a constreñir los modelos que determinen las POI de varios componentes de la reflectancia captada por sensores remotos, se tiene que tener un conocimiento general de la importancia de las contribuciones de los diferentes componentes a las propiedades ópticas. Debido a que el coeficiente de atenuación de haz es la suma de los coeficientes de dispersión y de absorción de los diferentes componentes, es útil ver como determinan estos componentes el coeficiente de atenuación de haz. Un ejemplo de las contribuciones relativas en la estación 8 se muestra en la figura 6, el cual es típico de los datos registrados en estos cruceros. Los datos se presentan para proporcionar una idea general de la contribución relativa de los diferentes componentes a las propiedades ópticas. Las longitudes de onda mostradas en la figura 6 son dos longitudes de onda en las cuales se basan muchos algoritmos del color del océano.

El coeficiente de absorción del agua pura aumenta con la longitud de onda mayor que 440 nm. Como se muestra en la figura 6, la

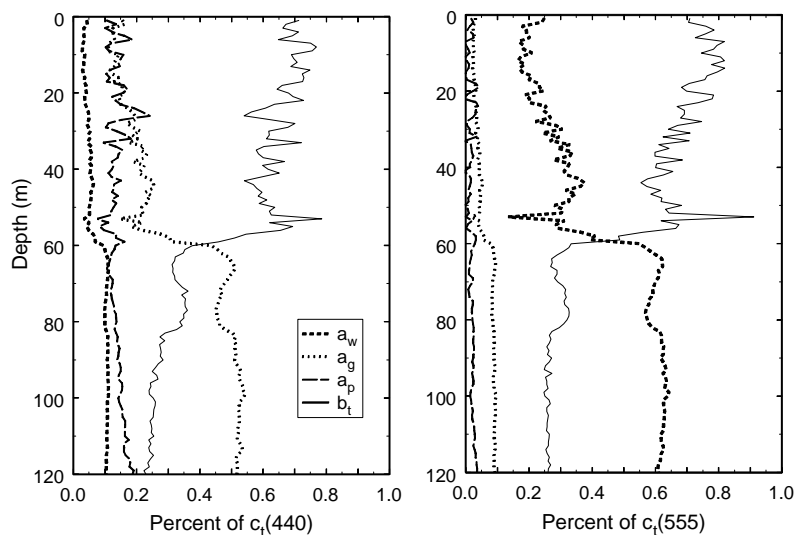


Figure 6. The relative contribution of the scattering (b_t) and absorption coefficients of water (a_w), dissolved materials (a_g), and particulate materials (a_p) at 440 and 555 nm. The data are from the 1998 cruise at station 8.

Figura 6. La contribución relativa de los coeficientes de dispersión (b_t) y absorción del agua (a_w), material disuelto (a_g) y material particulado (a_p) a 440 y 555 nm. Los datos son de la estación 8 del cruce de 1998.

of the gulf. In this region the scattering by resuspended materials is the dominant optical property. There is also higher contribution to the total attenuation by dissolved materials in this region.

Transects across the gulf showed that near-surface interannual variability was least in the center and increased towards either shore. This is probably related to coastal upwelling and the circulation of clear water entering the mouth of the gulf. In 1997, sharp gradients in a_p and a_g were observed at 45 m depth. These were accompanied by sharper density gradients than in other years. The stronger stratification observed during the 1997 cruise probably leads to increased photo-oxidation of organic materials reducing the a_g values in the surface waters. During an active upwelling event near Guaymas, we found evidence of a bloom as shown by large a_p values ($a_p(440 \text{ nm}) > 0.2 \text{ m}^{-1}$) in the upper 20 m. These

contribución relativa del coeficiente de absorción del agua al coeficiente de atenuación de haz aumenta en las longitudes de onda mayores. En las longitudes de onda mostradas, la dispersión por partículas forma la mayor parte del coeficiente de atenuación en las aguas superficiales. Por debajo del máximo de las partículas, el coeficiente de absorción del material disuelto y del agua conforman la mayor parte del coeficiente de atenuación de haz a 440 y 555 nm, respectivamente. Cerca de la superficie, los coeficientes de absorción del material disuelto y particulado proveen contribuciones casi iguales al coeficiente de atenuación de haz en ambas longitudes de onda.

DISCUSIÓN

Se ha reportado que los regímenes ópticos en el océano comúnmente son del Caso I o Caso II (Morel y Prier, 1977). Las propiedades ópticas del

large surface values in a_p were accompanied by a maximum in a_g at the surface, demonstrating local production of dissolved materials.

We found that the optical properties in the gulf as well as their vertical structure showed significant variability. Average spectra for the cruises were similar for a_g and c_{pg} , but greater variation is observed in a_p and b_p . The spectral shapes of a_p and b are similar for all cruises except the October 1997 cruise. This demonstrates that both the type of the particles (as seen in a_p) and the size distribution of the particles (as seen in b) varied between seasons.

The consistency of the shape of the optical properties in the winter season implies that an inversion model can be developed using these measured spectral shapes to determine the optical constituents in the Guaymas Basin from ocean color measurements. Further study will be required to determine the appropriate spectra during the summer season and the transition between seasons. Factors that determine the vertical profile of optical properties in the various seasons must also be addressed in the future. Future work will help to determine if the biogeographic provinces described in Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) have associated differences in vertical distribution or spectral optical properties.

SUMMARY

The Gulf of California presents a rich variety of conditions in which to study optical remote sensing. Resuspension of sediments in the shallow northwest region creates a strong Case II optical regime. In this area, the absorption by dissolved materials and the optical properties associated with particulate material increase more rapidly towards the shore.

In the central portion of the gulf, the largest variability in optical properties is observed near the coast, where upwelling becomes important. Away from the coast, the spectral optical properties of dissolved and particulate material

agua de Caso I son dominadas por el fitoplancton y sus derivados. Se encontró que casi todo el golfo mostró características de Caso I, con la excepción de la parte extrema del noroeste. En esta región, la dispersión por material resuspendido es la propiedad óptica dominante. También hay una contribución mayor a la atenuación total por el material disuelto en esta región.

Los transectos que atraviesan el golfo mostraron que la variabilidad interanual superficial fue menor en el centro e incrementó hacia ambas costas. Esto probablemente se debe a surgencias costeras y a la circulación del agua clara que entra en la boca del golfo. En 1997, se observaron gradientes abruptos de a_p y a_g a 45 m de profundidad, acompañados por gradientes de densidad más abruptos que en otros años. La estratificación más fuerte que se observó durante el crucero de 1997 probablemente conduce a una mayor fotooxidación del material orgánico, que reduce los valores de a_g en el agua superficial. Durante una surgencia activa frente a Guaymas, encontramos evidencia de un afloramiento, con valores altos de a_p ($a_p(440 \text{ nm}) > 0.2 \text{ m}^{-1}$) en los primeros 20 m. Estos valores superficiales altos de a_p se acompañaron con un máximo de a_g en la superficie, lo que demuestra una producción local de material disuelto.

Las propiedades ópticas en el golfo, así como su estructura vertical, presentaron una variabilidad significativa. Los espectros promedios de los cruceros fueron similares para a_g y c_{pg} , pero se observó mayor variación para a_p y b_p . Las formas espectrales de a_p y b son similares en todos los cruceros, con la excepción del de octubre de 1997. Esto indica que tanto el tipo de partículas (como se ve en a_p) como la distribución de tamaño de las partículas (como se ve en b) variaron entre las estaciones del año.

La consistencia en la forma de las propiedades ópticas durante el invierno implica que se puede desarrollar un modelo de inversión con base en las formas espectrales medidas para determinar los componentes ópticos en la Cuenca de Guaymas de mediciones del color del océano. Se

remain fairly constant. In the upper 50 m there is an increase in particulate material and a decrease in dissolved material relative to the deep water at the same location. The $a_g(440)$ values in the upper water column are comparable to the a_p values at the same wavelength. This indicates that the absorption by dissolved materials cannot be ignored in studies to invert remote sensing data.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the crews of *El Puma* (1995 cruise) and *Francisco de Ulloa* (1996, 1997 and 1998 cruises). We thank Jim Mueller and Oscar Montaña-Zavala for their assistance at sea. We thank two anonymous reviewers for their work in improving this manuscript. This work was supported by CONACYT, and the NASA SIMBIOS and SeaWiFS programs.

REFERENCES

- Kiefer, D.A. and Austin, R.W. (1974). The effect of varying phytoplankton concentration on submarine light transmission in the Gulf of California. *Limnol. Oceanogr.*, 19: 55–64.
- Kiefer, D.A. and SooHoo, J.B. (1982). Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California. *Limnol. Oceanogr.*, 27: 492–499.
- Lee, Z.P., Carder, K.L., Peacock, T.G., Davis, C.O. and Mueller, J.L. (1996). A method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance. *Appl. Opt.*, 35: 453–462.
- Moore, C., Bruce, E.J., Pegau, W.S. and Weidemann, A. (1997). The WET Labs ac-9: field protocol, deployment techniques, data processing and design improvements. In: S.G. Ackleson and R. Frouin (eds.), *Ocean Optics. XIII. Proc. SPIE 2963*, pp. 725–730.
- Morel, A. and Prieur, L. (1977). An analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, 22: 709–722.
- Roesler, C.S. and Perry, M.J. (1995). *In situ* phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance. *J. Geophys. Res.*, 100: 13279–13294.

requieren más estudios para determinar los espectros apropiados durante el verano y durante la transición de una estación del año a otra. Los factores que determinan el perfil vertical de las propiedades ópticas en las diferentes estaciones también requieren más estudio en el futuro. Otros trabajos ayudarán a determinar si las provincias biogeográficas descritas por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) tienen diferencias asociadas con la distribución vertical o las propiedades ópticas espectrales.

CONCLUSIONES

El Golfo de California presenta una gran variedad de condiciones para estudiar los datos de sensores ópticos remotos. La resuspensión de los sedimentos en la región somera del noroeste crea un régimen óptico fuerte de Caso II. En esta zona, la absorción por material disuelto y las propiedades ópticas asociadas con el material particulado aumenta más rápidamente hacia la costa.

En la parte central del golfo, se observa la mayor variabilidad en las propiedades ópticas cerca de la costa, donde las surgencias son importantes. Más lejos de la costa, las propiedades ópticas espectrales del material disuelto y particulado se mantienen relativamente constantes. En los primeros 50 m, hay un aumento en el material particulado y un decremento en el material disuelto, relativos al agua profunda en la misma localidad. Los valores de $a_g(440)$ en la columna de agua superior son comparables con los valores de a_p en la misma longitud de onda. Esto indica que la absorción por material disuelto no se puede ignorar en los estudios para invertir los datos de sensores remotos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la tripulación de *El Puma* (crucero de 1995) y *Francisco de Ulloa* (cruceros de 1996, 1997 y 1998); a Jim Mueller y Oscar Montaña-Zavala su ayuda en altamar; y a dos revisores anónimos sus comentarios que

Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7411–7421.

mejoraron el manuscrito. Este trabajo se realizó con apoyo financiero de CONACYT y de los programas NASA SIMBIOS y SeaWiFS.

Traducido al español por Jennifer Davis.
