

**EUPHOTIC DEPTH, IRRADIANCE ATTENUATION AND  
REMOTE SENSING K490 IN BIO-OPTICAL PROVINCES OF THE  
GULF OF CALIFORNIA**

**PROFUNDIDAD DE LA ZONA EUFÓTICA, ATENUACIÓN DE LA  
IRRADIANCIA Y K490 DE SENSORES REMOTOS EN  
PROVINCIAS BIOÓPTICAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA**

Rafael Cervantes-Duarte<sup>1+</sup>

James L. Mueller<sup>2</sup>

Charles C. Trees<sup>2</sup>

Helmut Maske<sup>3</sup>

Saúl Álvarez-Borrego<sup>3</sup>

Rubén Lara-Lara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Oceanología

CICIMAR-IPN

Apartado postal 592

La Paz, C.P. 23096, Baja California Sur, México

E-mail: rcervan@redipn.ipn.mx

<sup>2</sup> Center for Hydro-Optics and Remote Sensing

San Diego State University

6505 Alvarado Rd., Ste. 206

San Diego, CA 92120, USA

<sup>3</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)

Apartado postal 2732

Ensenada, C.P. 22800, Baja California, México

*Recibido en junio de 1999; aceptado en julio de 2000*

**ABSTRACT**

Algorithms are presented using remote sensing optical depth,  $1/K_{490}$ , to estimate the depth of the euphotic zone and depths where spectral irradiance at 490 nm are 10%, 3%, 1% and 0.3% of incident surface value. The linear empirical models are derived using data from radiometric profiles measured at various locations in the Gulf of California during cruises in 1995, 1997 and 1998. The models apply to three geographically and temporally separate bio-optical provinces of the gulf: the northern basin, the Midriff Islands and the southern basins. Relative uncertainties of the regression models for the 1% light

---

<sup>+</sup> Becario de la COFAA y ED.

depths for both spectral irradiance (490 nm) and  $E_{PAR}$  range from approximately 5% in the northern basin to 10% in the southern basins.

*Key words:* K490, euphotic zone, light attenuation, remote sensing.

## RESUMEN

Se presentan algoritmos que utilizan la profundidad óptica de los sensores remotos, 1/K490, para estimar la profundidad de la zona eufótica y las profundidades donde la irradiancia espectral a 490 nm se encuentra a 10%, 3%, 1% y 0.3% del valor incidente en la superficie. Los modelos empíricos lineales resultan de los datos de los perfiles radiométricos medidos en diferentes localidades del Golfo de California durante unos cruceros realizados en 1995, 1997 y 1998. Los modelos se aplicaron en tres provincias bioópticas separadas geográficamente del golfo: la cuenca norte, la zona de las islas y la cuenca sur. La incertidumbre relativa de los modelos de regresión para estimar la profundidad de 1% de luz tanto para la irradiancia espectral (490 nm) como para la  $E_{PAR}$  es de aproximadamente 5% en la cuenca norte y de 10% en la cuenca sur.

*Palabras clave:* K490, zona eufótica, atenuación de luz, sensores remotos.

## INTRODUCTION

The Gulf of California is a semi-enclosed, sub-tropical sea, characterized by a strong lateral gradient from low to moderate biological productivity in the southeast and high levels in the center and northwest. The rich water masses of the region support a wide variety of marine mammals and sea birds, as well as economically important commercial and sport fisheries. Despite its relatively small size, the gulf is an important region in the global silica cycle (Thunell *et al.*, 1994). Maxima in the interannual cycle of diatom accumulations in laminated sediment layers of the gulf's central basin have been identified as important proxy indicators of El Niño events throughout the 20th century (Baumgartner *et al.*, 1985). Because of its biogeochemical and climatic importance, there has been recent interest in applying satellite remotely sensed ocean color imagery to studies of phytoplankton biomass and primary productivity throughout the Gulf of California. Time series of phytoplankton pigment concentration, determined from

## INTRODUCCIÓN

El Golfo de California es un mar semi-cerrado y subtropical, caracterizado por un fuerte gradiente lateral de productividad biológica de baja a moderada en el sureste y con niveles altos en el centro y noroeste. La fertilidad de sus aguas mantienen una amplia diversidad de flora y fauna marina. Sus recursos pesqueros y su potencial turístico lo convierten en una región económica y comercialmente importante para el país. A pesar de su tamaño relativamente pequeño, el golfo es considerado como una importante región en el ciclo global del sílice (Thunell *et al.*, 1994). Los estudios de sedimentos laminados en la cuenca central del golfo han mostrado ciclos de sedimentación interanual en la acumulación de diatomeas. Estos incrementos han sido utilizados como registros indicadores de los eventos de El Niño a lo largo del siglo XX (Baumgartner *et al.*, 1985). Debido a la importancia biogeoquímica y climática que representa el Golfo de California, se ha incrementado el interés en aplicar las imágenes del color del océano,

Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner (CZCS) images, show general patterns of spatial and temporal variability in phytoplankton biomass within geographically distinct subareas of the gulf (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a). The CZCS data have also documented responses to the 1982–1983 El Niño event and associations between seasonal cycles of phytoplankton biomass and opal flux (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994b; Thunell *et al.*, 1994).

A limitation of satellite ocean color imagery is that its estimated patterns of variability in chlorophyll *a* concentration and diffuse attenuation coefficient at a wavelength of 490 nm, K490, pertain only to a shallow, near-surface layer of the water. Specifically, Gordon and McCluney (1975) showed that 90% of remotely sensed water-leaving radiance is reflected from the depth  $Z_{37\%}$  m, where downwelling irradiance at wavelength  $\lambda$  is

$$E_d(\lambda, Z_{37\%}) = E_d(\lambda, 0) e^{-1} \quad (1)$$

where  $E_d(\lambda, 0)$  is incident surface irradiance. Here we use the notation  $Z_{37\%}$  to indicate that irradiance at this depth is 37% of the incident surface irradiance. Gordon and McCluney (1975) used the symbol  $Z_{90}$  to refer to this same depth as the source of 90% of water-leaving radiance.

At a wavelength of 490 nm, the remote sensing depth,  $Z_{37\%}$ , may range from less than 1m in turbid coastal waters to approximately 40m in the clearest oligotrophic waters. In virtually all cases,  $Z_{37\%}$  is significantly shallower than the depth of the euphotic zone. Mueller and Lang (1989) showed, however, that in limited regions and over periods of several weeks, it is possible to empirically model variability of light penetration (at 490 nm) to as deep as the 0.1% level. They determined families of linear regression equations relating  $Z_{37\%}$  m at 490 nm, or 1/K490 m (see below

obtenidas por sensores remotos de satélites, para estudiar la biomasa del fitoplancton y la productividad primaria. Las series de tiempo de la concentración de pigmentos de fitoplancton, determinadas a partir de las imágenes del satélite Nimbus-7 y el sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS), mostraron en general patrones de variabilidad espaciotemporal de la biomasa de fitoplancton dentro de subáreas geográficamente distintas del golfo (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a). Con los datos del CZCS también se han documentado respuestas del evento El Niño 1982–1983 y su relación con los ciclos estacionales de biomasa de fitoplancton y el flujo de ópalo silicio de diatomeas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994b; Thunell *et al.*, 1994).

Una limitación de las imágenes de satélite del color del océano es que estiman patrones de variabilidad en la concentración de clorofila *a* y del coeficiente de atenuación de luz difusa a una longitud de onda de 490 nm, K490, a poca profundidad, cerca de la capa superficial. Específicamente, Gordon y McCluney (1975) mostraron que el 90% de la radiancia que emerge del agua y que es potencialmente monitoreada por los sensores remotos se refleja de la profundidad  $Z_{37\%}$  m, donde la irradiancia descendente a la longitud de onda  $\lambda$  es

$$E_d(\lambda, Z_{37\%}) = E_d(\lambda, 0) e^{-1} \quad (1)$$

donde  $E_d(\lambda, 0)$  es la irradiancia incidente en la superficie. Utilizaremos la notación  $Z_{37\%}$  para indicar que la irradiancia a esta profundidad es el 37% de la irradiancia incidente en la superficie. Gordon y McCluney (1975) emplearon el símbolo  $Z_{90}$  para referirse a esta misma profundidad como la fuente del 90% de radiancia que emerge del agua. En virtualmente todos los casos,  $Z_{37\%}$  es significativamente más somero que la profundidad de la zona eufótica. Mueller y Lang (1989) mostraron, sin embargo, que en

under Data and Methods), to the light attenuation depths  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$ ,  $Z_{0.3\%}$  and  $Z_{0.1\%}$ . Separate families of regression equations pertain to geographically distinct bio-optical provinces, each of which corresponds to a well known oceanographic regime (e.g., the California Current System, the NE Pacific Central Gyre, the Alaskan Gyre and the NE Pacific Sub-Arctic Front). The Mueller and Lang (1989) light penetration model for the NE Pacific Gyre was applied and extended to estimates of  $K_{PAR}$  by Zaneveld *et al.* (1993), as part of a model estimating vertically integrated primary productivity from ocean color data.

In the present paper, we follow the method of Mueller and Lang (1989) to report families of regression models giving  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  and  $Z_{0.3\%}$  as functions of  $1/K_{490}$  m ( $Z_{37\%}$ ) at 490 nm for three bio-optical provinces in the Gulf of California. We also report algorithms estimating the depth of the euphotic zone ( $Z_{1\%}$  for PAR) from remotely sensed  $1/K_{490}$ . Within each province, SeaWiFS K490 image data can be used with these models to derive maps of three-dimensional  $K(490, z)$ , and of  $Z_{1\%}$  for PAR.

### The oceanographic regime

The Gulf of California is approximately 150 km wide by 1000 km long, with its longer axis oriented in a northwest to southeast direction. It separates the Baja California peninsula from continental Mexico between 23°N and 32°N latitude. The Colorado River discharges into the extreme northern end of the gulf and at its southern end, the sea opens to the northern Pacific Ocean. The topography of the gulf comprises a series of basins and trenches, which deepen from north to south and are separated by transverse ridges (Shepard, 1950). Following Lavín *et al.* (1997), we group the main topographic provinces as the northern

ciertas regiones y en periodos de semanas, es posible modelar empíricamente la variabilidad de la penetración de la luz (a 490 nm) tan profundo como al nivel de 0.1%. Estos autores determinaron familias de ecuaciones de regresión lineal relacionando  $Z_{37\%}$  m a 490 nm, o  $1/K_{490}$  m (ver la sección de Datos y Métodos), con las profundidades de atenuación de luz de  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$ ,  $Z_{0.3\%}$  y  $Z_{0.1\%}$ . Familias separadas de ecuaciones de regresión pertenecen a provincias bioópticas geográficamente distintas, cada una de las cuales corresponde a un bien conocido régimen oceanográfico (e.g., el sistema de la Corriente de California, el giro central del Pacífico NE, el giro de Alaska y el frente subártico del Pacífico NE). El modelo de penetración de luz empleado por Mueller y Lang (1989) para el giro del Pacífico NE fue aplicado y extendido a las estimaciones de  $K_{PAR}$  por Zaneveld *et al.* (1993), como parte de un modelo para estimar la productividad primaria integrada verticalmente a partir de los datos del color del océano.

En el presente trabajo, seguimos el método de Mueller y Lang (1992) para reportar familias de modelos de regresión a partir de  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  y  $Z_{0.3\%}$  en función de  $1/K_{490}$  ( $Z_{37\%}$ ) a 490 nm para tres provincias bioópticas en el Golfo de California. También reportamos algoritmos que estiman la profundidad de la zona eufótica ( $Z_{1\%}$  de PAR) a partir de los datos de  $1/K_{490}$  de sensores remotos. Dentro de cada provincia, los datos de K490 de las imágenes del SeaWiFS pueden ser utilizados con estos modelos para producir mapas en tres dimensiones de  $K(490, z)$  y de  $Z_{1\%}$  de PAR.

### El régimen oceanográfico

El Golfo de California tiene aproximadamente 150 km de amplitud y 1000 km de longitud, con su eje mayor orientado en una dirección noroeste a sureste. Separa la

basin, Midriff Islands and sill, and the series of southern basins extending southeast from the Midriff Islands (fig. 1). The Guaymas Basin, which lies immediately south of the Midriff Islands, is an important subregion of the southern basins province. We do not consider, due to lack of appropriate data in the present paper, the important region near the mouth of the Gulf of California.

The Gulf of California has been previously partitioned into biogeographic provinces, or regions, by several investigators. Allen (1937), Gilbert and Allen (1943) and Round (1967) separated and grouped the various geographic and topographic regions on the basis of phytoplankton populations. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) divided the gulf into 14 biogeographic regions based on correlation analysis of temporal variability of CZCS pigment concentrations at 33 fixed locations.

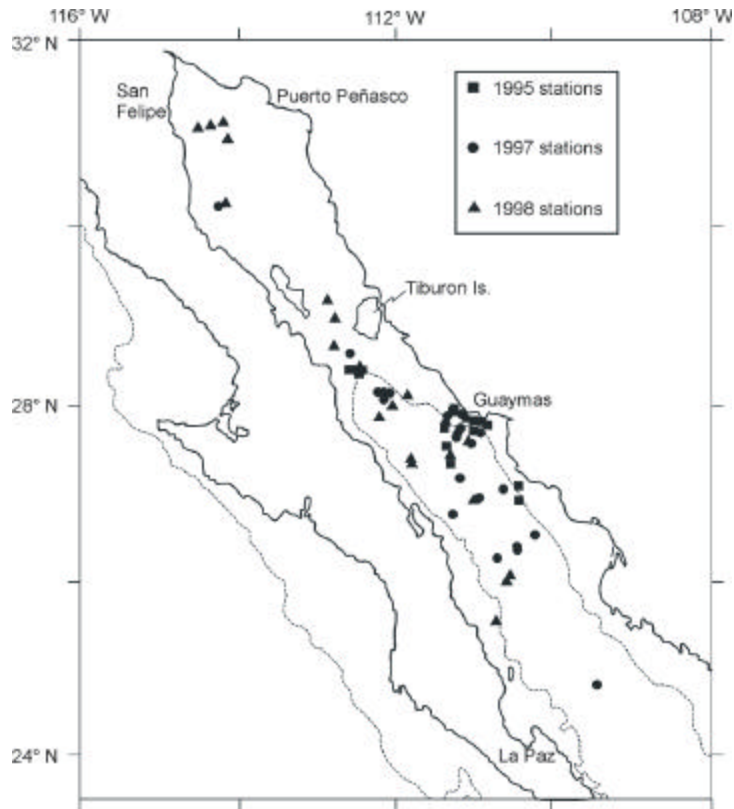
The northern basin extends from the Colorado River delta southeastward to the Midriff Islands (fig. 1). Water depth in the northern basin is generally 200 m, or shallower, except in Delfín Basin just north of Ángel de la Guarda Island. Water depth is 30m or less in the triangular area, having apexes at the mouth of the Colorado River, San Felipe and Puerto Peñasco (Upper Gulf); strong tidal currents, augmented by wind waves, maintain a well-mixed water column with high concentrations of suspended sediments here (Lavín *et al.*, 1997). Tidal mixing and breaking internal waves also produce strong vertical mixing in the region adjacent to the Midriff Islands at the southern extreme of the northern basin (Fu and Holt, 1984; Paden *et al.*, 1991).

The Midriff Islands (Tiburón Island, Ángel de la Guarda Island and several smaller islands) and shallow interconnecting ridges near 29°N separate the northern basin from the southern regions of the gulf (fig. 1). The shallow ridges and narrow channels between these islands restrict water mass exchange between the

península de Baja California del continente entre 23°N y 32°N de latitud. El Río Colorado descarga en la parte septentrional del golfo y en su parte meridional se comunica con el norte del Océano Pacífico. La topografía del fondo está formada por una serie de cuencas y trincheras, cuya profundidad aumenta de norte a sur y que se encuentran separadas por cordilleras transversales (Shepard, 1950). De acuerdo con Lavín *et al.* (1997), agrupamos las principales provincias topográficas en la cuenca norte, la zona de las islas y umbral, y la serie de cuencas en el sur (cuenca sur), que comprende desde el sureste de la zona de las islas (fig. 1). La Cuenca de Guaymas se localiza inmediatamente al sur de la zona de las islas y es parte importante de la subregión de la provincia de la cuenca sur. La importante región cerca de la boca del Golfo de California no fue considerada aparte, debido a la falta de datos en este trabajo.

El Golfo de California ha sido previamente dividido en provincias geográficas, o regiones, por algunos investigadores. Allen (1937), Gilbert y Allen (1943) y Round (1967) separaron y agruparon las diferentes regiones geográficas y topográficas con base en las poblaciones de fitoplancton. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1995) dividieron el golfo en 14 regiones biogeográficas con base en el análisis de correlación de la variabilidad temporal de las concentraciones de pigmentos del CZCS en 33 localidades fijas.

La cuenca norte se extiende del delta del Río Colorado hacia el sureste de la zona de las islas (fig. 1). La profundidad en la cuenca norte es generalmente de 200 m, o menor, excepto en la Cuenca Delfín justo al norte de la Isla Ángel de la Guarda. En el área que forma un triángulo con sus vértices orientados hacia la boca del Río Colorado, San Felipe y Puerto Peñasco, la profundidad es de 30 m o menor. En esta zona son comunes las fuertes corrientes de marea y el oleaje producido por el viento, que



**Figure 1.** Map of the Gulf of California showing the locations of oceanographic stations at which the data presented here were acquired in 1995, 1996 and 1997. The 500-m isobath is shown to indicate the general topography.

**Figura 1.** Mapa del Golfo de California. Se muestran las estaciones oceanográficas donde se obtuvieron en 1995, 1996 y 1997 los datos presentados en este trabajo, así como la isóbata de 500 m para indicar la topografía general.

northern basin and the rest of the gulf, and the complex topography contributes to complicated and energetic meteorological and oceanographic conditions (Roden and Groves, 1959; Badan-Dangon *et al.*, 1985). Tidal forcing produces deep vertical mixing over the sill and adjacent water masses, as well as complicated patterns of strong tidal currents in the passages between the islands (Álvarez-Borrego, 1983; Bray and Robles, 1991; Simpson *et al.*, 1994;

mantienen una columna de agua bien mezclada con altas concentraciones de sedimentos en suspensión (Lavín *et al.*, 1997). La mezcla por mareas y el rompimiento de ondas internas también producen una fuerte mezcla vertical en la región adyacente a la zona de las islas en el extremo sur de la cuenca norte (Fu y Holt, 1984; Paden *et al.*, 1991).

La zona de las islas (Isla Tiburón, Isla Ángel de la Guarda y otras pequeñas islas) y la

Argote *et al.*, 1995). Mixing over and approaching the sills is dominated by large breaking internal waves (Fu and Holt, 1984; Paden *et al.*, 1991).

The topography of the southern basins province consists of a series of three basins where maximum depths exceed 2000 m, with average water depth becoming generally more shallow proceeding from south to north (Shepard, 1950). In this region, the continental shelf is narrow on the western boundary (off Baja California) and typically 30 km in width on the eastern boundary (continental Mexican coast) of the basin. Prevailing winds are monsoonal over the Gulf of California, blowing from the northwest in winter (November to May) and from the southeast in summer (June to October) (Roden, 1964). During the winter condition, coastal upwelling occurs actively over the continental shelf and upper slope on the eastern boundary of the gulf (e.g., Roden, 1964; Badan-Dangon *et al.*, 1985; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a).

#### DATA AND METHODS

Over the past several years, investigators from CICESE, CICIMAR-IPN, San Diego State University (SDSU) and Oregon State University have collaborated in a series of research cruises to measure *in situ* biological, optical and physical properties of water masses throughout the Gulf of California. The cruise stations were localized in as many different surface water masses as possible. These data are now being used, in combination with imagery from the SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field Spectrometer) satellite ocean color system, to characterize three-dimensional bio-optical variability, phytoplankton biomass and productivity in various subregions of the gulf (Pegau *et al.*, 1998, 1999; Barnard *et al.*, 1998, 1999). The data used in the present paper were acquired during three of these cruises:

cordillera somera que se interconecta cerca de los 29°N separa la cuenca norte de la región sur del golfo (fig. 1). La cordillera somera y los canales estrechos entre las islas restringen el intercambio de masas de agua entre la cuenca norte y el resto del golfo, aunado a la compleja topografía que contribuye a la formación de complicadas condiciones energéticas tanto meteorológicas como oceanográficas (Roden y Groves, 1959; Badan-Dangon *et al.*, 1985). Las corrientes de marea producen una mezcla vertical profunda en el umbral y en las masas de agua adyacentes, así como patrones complejos por fuertes corrientes de marea en su recorrido entre las islas (Álvarez-Borrego, 1983; Bray y Robles, 1991; Simpson *et al.*, 1994; Argote *et al.*, 1995). La mezcla en y cerca del umbral es dominada por el elevado rompimiento de ondas internas (Fu y Holt, 1984; Paden *et al.*, 1991).

La topografía de la provincia de la cuenca sur está formada de una serie de tres cuencas donde la máxima profundidad excede los 2000m; en promedio, la profundidad es más somera de sur a norte (Shepard, 1950). En esta región, la plataforma continental es estrecha en la costa oeste (frente a Baja California) y generalmente de una amplitud de 30 km en la costa oriental (costa continental de México) de la cuenca. En el Golfo de California los vientos dominantes son de tipo monsoon, con dirección del noroeste en invierno (noviembre a mayo) y del sureste en verano (junio a octubre) (Roden, 1964). Durante la condición de invierno, se presentan activamente surgencias costeras en la plataforma continental y sobre el talud de la costa este del golfo (e.g., Roden, 1964; Badan-Dangon *et al.*, 1985; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1995).

#### DATOS Y MÉTODOS

En los últimos años, investigadores de CICESE, CICIMAR, San Diego State University (SDSU) y Oregon State University han

23 November to 12 December 1995, R/V *El Puma*; 16 to 29 October 1997, R/V *Francisco de Ulloa*; and 4 to 16 March 1998, R/V *Francisco de Ulloa*. The locations of stations at which measurements were made during these cruises are illustrated in figure 1.

A PRR600/610 environmental radiometer system, manufactured by Biospherical Instruments Inc. of San Diego, California, was used to measure vertical profiles of spectral downwelling irradiance  $E_d(\lambda, z)$ , spectral upwelling radiance  $L_u(\lambda, z)$  and  $E_{PAR}(z)$ , together with concurrent above-water values of spectral surface incident irradiance  $E_s(\lambda)$  and  $E_d(PAR, z)$ . Measurements were made following protocols given in Mueller and Austin (1995). The PRR radiometers were calibrated at SDSU-CHORS before and after each cruise. PRR profiles were analyzed to determine  $E_d(\lambda, 0^-)$ ,  $K_d(\lambda, z)$ ,  $L_u(\lambda, 0^-)$  and  $K_{lu}(\lambda, z)$  using the integral method of Mueller (1995). The notation  $0^-$  refers to the depth  $z = 0$  just beneath the air-sea interface, while the counterpart notation  $0^+$  refers to  $z = 0$  just above the interface. The above-water surface irradiance  $E_s(\lambda, z)$  was fit to determine a value  $E_s(\lambda, 0^+)$  and to normalize the radiometric profiles to remove variability induced by changes in surface illumination during each cast (Mueller, 1995). The notation  $E_s(\lambda, z)$  is at first confusing, but in this context  $z$  refers to depth of the in-water profiler package at the time the above-water deck cell data were recorded. For the present study, the smoothed downwelling irradiance profiles were processed to automatically extract  $Z_{37\%}$  ( $K_{490}^{-1}$ ),  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$ , and  $Z_{0.3\%}$  for  $E_d(490, z)$  and  $Z_{1\%}$  for  $E_d(PAR, z)$ .

Equation (1) is a special case of irradiance attenuation according to the Beer-Lambert law:

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0) e^{-\tau(\lambda, z)} \quad (2)$$

colaborado en una serie de cruceros oceanográficos con el propósito de medir *in situ* las propiedades biológicas, ópticas y físicas de las masas de agua en el Golfo de California. Las estaciones en los cruceros fueron ubicadas en tantas diferentes masas de agua superficial como fue posible. Estos datos se están combinando con las imágenes de satélite del color del océano del SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field Spectrometer) para caracterizar en forma tridimensional la variabilidad bioóptica, la biomasa y productividad del fitoplancton en varias subregiones del golfo (Pegau *et al.*, 1998, 1999; Barnard *et al.*, 1998, 1999). Los datos utilizados en el presente trabajo fueron recolectados durante tres de estos cruceros: del 23 de noviembre al 12 de diciembre de 1995, B/O *El Puma*; del 16 al 29 de octubre de 1997, B/O *Francisco de Ulloa*; y del 4 al 16 de marzo de 1998, B/O *Francisco de Ulloa*. La localización de las estaciones en las que se hicieron las mediciones durante los tres cruceros se muestra en la figura 1.

Para medir los perfiles verticales de irradiancia espectral descendente  $E_d(\lambda, z)$ , radiancia espectral ascendente  $L_u(\lambda, z)$  y  $E_{PAR}(z)$ , se utilizó un sistema de radiómetros ambientales PRR600/610, diseñado por Biospherical Instruments Inc., San Diego, California, junto con mediciones simultáneas por arriba de la superficie del agua de irradiancia incidente  $E_s(\lambda)$  y  $E_d(PAR, z)$ . Las mediciones fueron hechas de acuerdo con los protocolos de Mueller y Austin (1998). Los radiómetros PRR fueron calibrados en SDSU-CHORS antes y después de cada crucero. Los perfiles de PRR fueron analizados para determinar  $E_d(\lambda, 0^-)$ ,  $K_d(\lambda, z)$ ,  $L_u(\lambda, 0^-)$  y  $K_{lu}(\lambda, z)$  utilizando el método de integración de Mueller (1998). La notación  $0^-$  se refiere a la profundidad  $z = 0$  justo debajo de la interfase aire/agua, en tanto que  $0^+$  indica que  $z = 0$  se encuentra justo arriba de la interfase. La irradiancia superficial sobre el agua  $E_s(\lambda, z)$  fue



where the diffuse optical depth  $\tau(\lambda, Z_{37\%}) = 1.0$ . By definition,  $\tau(\lambda, z) = \langle K(\lambda, z) \rangle z$ , where  $\langle K(\lambda, z) \rangle \text{ m}^{-1}$  is the average from the surface to depth  $z$  meters of the diffuse attenuation coefficient  $K(\lambda, z) \text{ m}^{-1}$ . In the diffuse attenuation coefficient algorithms for CZCS (Austin and Petzold, 1981) and SeaWiFS (Mueller and Trees, 1997), the average variable  $\langle K(490, Z_{37\%}) \rangle$  is referred to as K490. From (1), (2) and the definition of  $\tau(\lambda, z)$ , we have for 490 nm the remote sensing depth  $Z_{37\%} = 1/\text{K490 m}$ .

In a vertically homogeneous case,  $K_d(490, z) = \text{K490}$  is constant over depth and it easily follows from (2) and the definition of  $\tau(\lambda, z)$  that  $Z_{n\%} = \tau(490, Z_{n\%})/\text{K490 m}$ . For this simple case, isolines of  $Z_{n\%}$  ( $n = 10\%, 3\%, 1\%, 0.3\%$ ) as functions of  $1/\text{K490} = Z_{37\%}$  comprise a family of four straight lines going through the origin with slopes  $\tau(490, Z_{n\%}) = 2.30, 3.51, 4.61$  and  $5.81$ , respectively. The four isolines for a vertically homogeneous water column are illustrated, as a background reference, in figures 2, 3 and 4. If the optical properties of the water column are vertically stratified, so that  $K_d(490, z)$  varies with depth, the isolines of  $Z_{n\%}$  versus  $1/\text{K490}$  no longer follow this simple relationship. If the  $Z_{n\%}$  versus  $1/\text{K490}$  isolines for vertically stratified profiles in a given geographic region follow a statistically straight-line relationship (with a non-zero intercept and arbitrary slope), that region is identified as a bio-optical province (Mueller and Lang, 1989).

$Z_{37\%}$  ( $1/\text{K490}$ ) was determined by inspection from each measured PRR profile of  $E_d(490, z)$  as the depth where  $E_d(490, Z_{37\%})/E_d(490, 0) = 0.37$ . The same procedure was used to find the depths  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  and  $Z_{0.3\%}$ , corresponding to optical depths  $\tau(490, Z_{n\%}) = 2.30, 3.51, 4.61$  and  $5.81$ , respectively. Following the approach of Mueller and Lang (1989), these data were grouped by

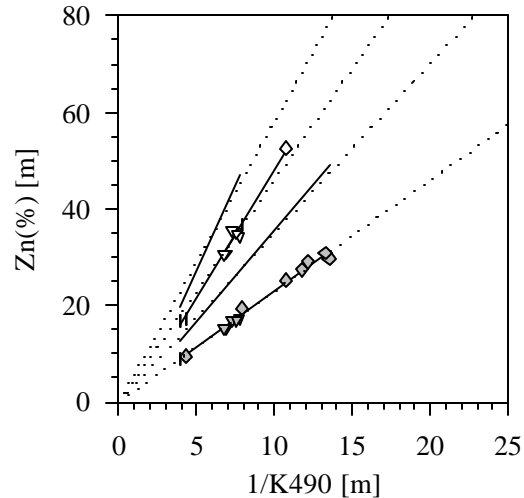
ajustada para determinar el valor de  $E_s(\lambda, 0)$ , para normalizar los perfiles radiométricos y eliminar la variabilidad inducida por los cambios en la iluminación en la superficie durante cada lance vertical (Mueller, 1998). La notación  $E_s(\lambda, z)$  es en principio confusa, aunque en este contexto  $z$  se refiere a la profundidad del perfilador en el agua al momento en que la celda se encuentra tomando datos arriba de la superficie del agua. En el presente estudio, el filtrado de los datos de irradiancia descendente fue procesado automáticamente para  $Z_{37\%}$  ( $\text{K490}^{-1}$ ),  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  y  $Z_{0.3\%}$  para  $E_d(490, z)$  y  $Z_{1\%}$  para  $E_d(\text{PAR}, z)$ .

La ecuación (1) es un caso especial de atenuación de irradiancia de acuerdo con la Ley de Lambert-Beer:

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0) e^{-\tau(\lambda, z)} \quad (2)$$

donde la profundidad óptica difusa  $\tau(\lambda, Z_{37\%}) = 1.0$ . Por definición,  $\tau(\lambda, z) = \langle K(\lambda, z) \rangle z$ , donde  $\langle K(\lambda, z) \rangle \text{ m}^{-1}$  es el promedio del coeficiente de atenuación difusa  $K(\lambda, z) \text{ m}^{-1}$  de la superficie a la profundidad  $z$  en metros. En los algoritmos del coeficiente de atenuación difusa para el CZCS (Austin y Petzold, 1981) y SeaWiFS (Mueller y Trees, 1998), la variable promedio  $\langle K(490, Z_{37\%}) \rangle$  es representada como K490. De las ecuaciones (1) y (2) y la definición de  $\tau(\lambda, z)$ , obtenemos a 490nm la profundidad registrada por los sensores remotos  $Z_{37\%} = 1/\text{K490 m}$ .

En un caso de una columna de agua homogénea,  $K_d(490, z) = \text{K490}$  es constante con la profundidad y es sencillo obtener a partir de (2) y de la definición de  $\tau(\lambda, z)$  que  $Z_{n\%} = \tau(490, Z_{n\%})/\text{K490 m}$ . Para este caso simple, las isolíneas de  $Z_{n\%}$  ( $n = 10\%, 3\%, 1\%, 0.3\%$ ) como funciones de  $1/\text{K490} = Z_{37\%}$  forman una familia de cuatro líneas rectas que parten del origen con pendientes  $\tau(490, Z_{n\%}) = 2.30, 3.51, 4.61$  y  $5.81$ , respectivamente. En las



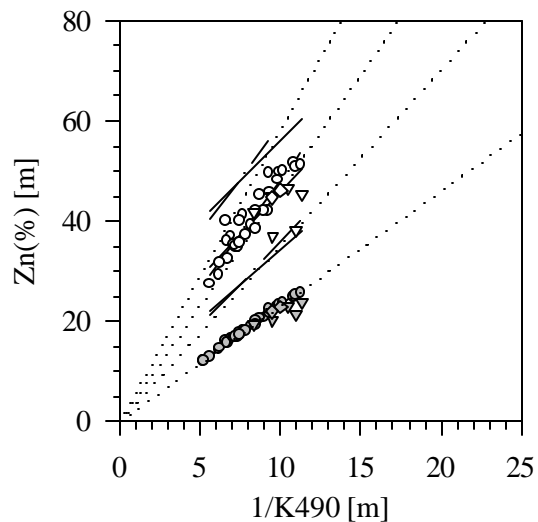
**Figure 2.** Scatter and regression relationships between optical remote sensing depth  $1/K490$  (meters) and the depths  $Z_{n\%}$  (meters), where  $E_d(490, Z_{n\%})$  is attenuated to  $n = 10\%$ ,  $3\%$ ,  $1\%$  and  $0.3\%$  of  $E_d(490, 0^-)$  (from bottom to top), in the northern basin province for 1997 (triangles) and 1998 (diamonds). The solid lines are the regression results for the 1997 and 1998 data combined. The dotted lines illustrate the light attenuation depth relationships for a vertically homogeneous water column. For clarity of presentation, only the data for the  $10\%$  (shaded symbols) and  $1\%$  (open symbols) light attenuation depths are shown; scatter for the other attenuation levels is similar.

**Figura 2.** Relación de la dispersión y de la regresión entre la profundidad óptica de los sensores remotos,  $1/K490$  (metros), y las profundidades  $Z_{n\%}$  (metros), donde la atenuación de  $E_d(490, Z_{n\%})$  es a  $n = 10\%$ ,  $3\%$ ,  $1\%$  y  $0.3\%$  de  $E_d(490, 0^-)$  (de abajo a arriba) en la provincia de la cuenca norte para 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes). Las líneas continuas representan las regresiones para los datos combinados de 1997 y 1998. Las líneas punteadas muestran las relaciones de la profundidad de atenuación de luz para una columna de agua verticalmente homogénea. Para claridad, se presentan sólo los datos de la profundidad de atenuación de  $10\%$  (símbolos rellenos) y  $1\%$  (símbolos claros); la dispersión de los datos de los otros niveles de luz es similar.

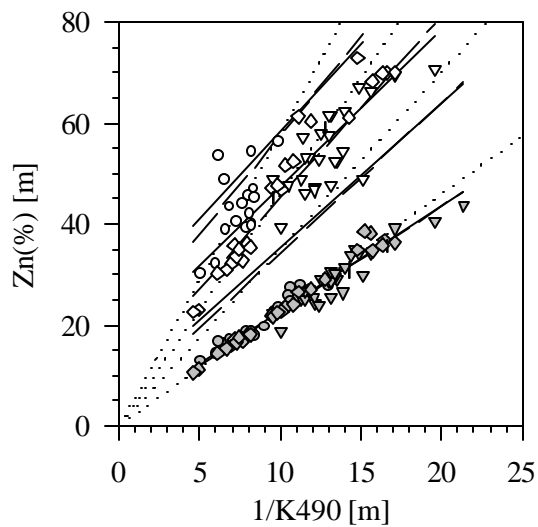
locations within geographic provinces of the gulf, which were hypothetically assumed to be different bio-optical provinces. This partitioning was done by inspecting the scatter plot for the overall sample to isolate groupings associated with particular geographic regions in the gulf. Within each hypothetical province, and for each attenuation depth  $Z_{n\%}$ , simple linear regression analysis was used to determine an equation of the form

$$Z_{n\%} = A_{n\%} + B_{n\%} (1/K490) \quad (3)$$

figuras 2, 3 y 4 se presentan las cuatro isolíneas para una columna de agua verticalmente homogénea. En cambio, si las propiedades ópticas de una columna de agua están verticalmente estratificadas, de modo que  $K_d(490, z)$  varía con la profundidad, las isolíneas de  $Z_{n\%}$  versus  $1/K490$  no siguen la relación simple anterior. Si las isolíneas de  $Z_{n\%}$  versus  $1/K490$  para perfiles verticalmente estratificados en una región geográfica determinada tienden a una relación estadísticamente lineal (con un intercepto diferente de cero y una pendiente



**Figure 3.** The same as figure 2 but for the province of the Midriff Islands, for 1995 (circles), 1997 (triangles) and 1998 (diamonds). The dashed regression line is for the 1995 data analyzed separately.  
**Figura 3.** Igual que la figura 2 pero para la provincia de la zona de las islas, para 1995 (círculos), 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes). La línea de regresión cortada representa los datos de 1995 analizados por separado.



**Figure 4.** The same as figure 3 but for the province of the southern basins, for 1995 (circles), 1997 (triangles) and 1998 (diamonds).  
**Figura 4.** Igual que la figura 3 pero para la provincia de la cuenca sur, para 1995 (círculos), 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes).

where  $A_{n\%}$  and  $B_{n\%}$  are the least-squares regression intercept and slope. Individual apparent outliers within a sample for a given province were set aside for special consideration and were excluded from the regression analyses. A province classification and data grouping was deemed confirmed if statistically significant linear regression lines resulted from this analysis, and if the 90% confidence limits (CL) of the regression coefficients exclude those of similar regressions for other provinces.

Because we wish to predict  $Z_{n\%}$  variables from ocean color K490 imagery rather than determine the degree of correlation between variables, we employed a simple type 1 regression, in preference to the type 2 regression that has recently become popular for fitting data to remote sensing algorithms.

Zaneveld *et al.* (1993) found  $K_{PAR}(z)$  to be strongly correlated with  $K_d(490, z)$  in the northeastern Pacific Ocean, and reported linear regression equations relating  $\tau_{PAR}(z)$  to  $\tau(490, z)$  in three optical depth ranges. Barnard *et al.* (1999) recently found a similar correlation for the Gulf of California, but used a third order polynomial relating  $\tau_{PAR}(z)$  to  $\tau(490, z)$  over the entire water column. On the basis of these results, we also expect  $Z_{1\%}$  for PAR, the depth of the euphotic zone, to show a statistically significant linear dependency on  $1/K490$  within each province of the Gulf of California. The PRR-600 radiometer's PAR channel is actually configured with a cosine collector and therefore measures  $E_{PAR}(z)$  rather than scalar PAR( $z$ ). We assume that the up to 6% difference (Kirk, 1994) in attenuation between these variables is negligible, compared to environmental uncertainty and to much larger uncertainty in the pressure responses of spherical PAR collectors used in commercially available instruments. Therefore, we took  $Z_{1\%}$  for  $E_{PAR}(z)$  as our estimate of euphotic zone depth, paired it with  $1/K490$  for each station, grouped the data pairs according

arbitraria), esta región es identificada como una provincia bioóptica (Mueller y Lang, 1989).

Los valores de  $Z_{37\%}$  ( $1/K490$ ) fueron determinados por la verificación de cada perfil de PRR medido de  $E_d(490, z)$  como la profundidad donde  $E_d(490, 0)/E_d(490, Z_{37\%}) = 0.37$ . El mismo procedimiento fue utilizado para encontrar las profundidades  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  y  $Z_{0.3\%}$ , que corresponden a las profundidades  $\tau(490, Z_{n\%}) = 2.30, 3.51, 4.61$  y  $5.81$ , respectivamente. Siguiendo el método de Mueller y Lang (1989), estos datos fueron agrupados por localidades dentro de subregiones geográficas del golfo, las cuales suponemos hipotéticamente corresponden a diferentes provincias bioópticas. Esta división fue realizada por la revisión de las gráficas de dispersión de todas las mediciones para separar grupos asociados como regiones geográficas particulares en el golfo. Dentro de cada provincia hipotética, y para cada profundidad de atenuación  $Z_{n\%}$ , un análisis de regresión lineal simple fue utilizado para determinar una ecuación de la forma

$$Z_{n\%} = A_{n\%} + B_{n\%} (1/K490) \quad (3)$$

donde  $A_{n\%}$  y  $B_{n\%}$  son el intercepto y la pendiente de la regresión por mínimos cuadrados. En cada muestreo se registraron datos individuales aparentemente alejados de la tendencia de una determinada provincia; estos datos se consideraron por separado como casos especiales y fueron excluidos del análisis de regresión. La clasificación de una provincia y el agrupamiento de datos fue considerado confirmando la significancia estadística de las líneas de regresión lineal que resultaron de este análisis, y considerando si los límites de confianza (CL) de 90% de los coeficientes de regresión excluyen a otros de regresiones similares para otras provincias.

Debido a que se pretende predecir las variables  $Z_{n\%}$  de las imágenes del color del océano más que determinar el grado de correlación

to bio-optical provinces, and used simple linear regression analysis to determine the coefficients for equation (3) in each province.

## RESULTS

Inspection of scatter plots of  $(1/K490, Z_{n\%})$  data pairs, described above, tentatively identified three separate provinces: the northern basin (stations north of Delfín Basin, fig. 1), the Midriff Islands and sill, and the southern basins. There were too few stations over the eastern continental shelf (fig. 1) to separate that region into a separate province (province X in Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a). Nor were there a sufficient number of stations in the southern portions of the southern basins province to separate the Guaymas Basin from the overall area (provinces VIII, IX and XI in Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a). Regression coefficients  $A_{n\%}$  and  $B_{n\%}$  according to equation (3) for the 10%, 3%, 1% and 0.3% light levels in each province are listed in table 1. Values in parentheses following each coefficient are the 90% CL. All regression equations are significant at the 0.995 level by Fisher's  $F$ -distribution criterion, and in each province the data are well distributed over the range of the fit. With the exception of the  $Z_{0.3\%}$  equation for the province of the Midriff Islands, the 90% CL of the regression slopes  $B_{n\%}$  all exclude zero. Regression coefficients were also computed for data within some individual years, but only the 1995 Midriff Islands results are included in table 1. In every other case where there were sufficient data in a single year for a separate regression analysis, the slopes and intercepts fell within the 90% CL of the overall regression fit. The overall Midriff Islands and southern basins regression coefficients are not significantly different, according to their 90% CL, but the 1995 Midriff Islands regression coefficients are significantly different from both of the others.

entre las variables, se utilizaron regresiones simples tipo 1, en lugar de regresiones tipo 2, las cuales recientemente son más populares para el ajuste de datos para los algoritmos de sensores remotos.

Zaneveld *et al.* (1993) encontraron que  $K_{PAR}(z)$  está fuertemente correlacionada con  $K_d(490, z)$  en el noreste del Océano Pacífico y reportaron las ecuaciones de regresión lineal  $\tau_{PAR}(z)$  a  $\tau(490, z)$  en tres intervalos de profundidad óptica. Barnard *et al.* (1999) recientemente encontraron una correlación similar para el Golfo de California, aunque utilizando una relación polinomial de tercer orden que relaciona  $\tau_{PAR}(z)$  a  $\tau(490, z)$  en toda la columna de agua. Por lo tanto, es de esperarse que en  $Z_{1\%}$  de PAR, la profundidad de la zona eufótica también muestre una dependencia lineal estadísticamente significativa sobre  $1/K490$  dentro de cada provincia del Golfo de California. El canal de PAR de los radiómetros PRR-600 está actualmente configurado como un colector coseno y, por tanto, mide  $E_{PAR}(z)$  más que  $PAR(z)$  escalar. Por lo tanto, suponemos que una diferencia de 20% en la atenuación entre estas variables es despreciable, comparada con la incertidumbre ambiental y la mucho mayor incertidumbre en la respuesta del colector esférico de PAR utilizado en instrumentos comerciales. Por lo tanto, consideramos  $Z_{1\%}$  para  $E_{PAR}(z)$  como nuestra estimación de la profundidad de la zona eufótica, junto con  $1/K490$  para cada estación, agrupando las parejas de datos de acuerdo con las provincias bioópticas, y utilizando un análisis de regresión lineal simple para determinar los coeficientes para la ecuación (3) en cada provincia.

## RESULTADOS

Con la verificación de los diagramas de dispersión de las parejas de datos  $(1/K490, Z_{n\%})$  descritas anteriormente, tentativamente se

**Table 1.** Simple linear regression models giving light attenuation depths  $Z_{n\%}$  (meters) ( $n = 10\%$ ,  $3\%$ ,  $1\%$  and  $0.3\%$ ) for  $E_d(490, z)$ , as functions of  $1/K490$  (meters) in three provinces of the Gulf of California. The variable  $\tau_n(490)$  is diffuse optical depth at the  $n\%$  light depth and wavelength 490 nm.  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $r$  and  $S_{xy}$  are the regression intercept, slope, correlation coefficient and standard error of regression, respectively. Values in square brackets are 90% confidence limits.

**Tabla 1.** Modelos de regresión lineal simple a las profundidades de atenuación de luz  $Z_{n\%}$  (metros) ( $n = 10\%$ ,  $3\%$ ,  $1\%$  y  $0.3\%$ ) para  $E_d(490, z)$ , en función de  $1/K490$  (metros) en tres provincias del Golfo de California. La variable  $\tau_n(490)$  es la profundidad óptica difusa al  $n\%$  de la profundidad de luz y a una longitud de onda de 490 nm.  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $r$  y  $S_{xy}$  son, respectivamente, el intercepto, la pendiente, el coeficiente de correlación y el error estándar de la regresión. Los valores en los corchetes son límites de confianza al 90%.

$n\%$	$\tau_n(490)$	$A_n$	$B_n$	$r^2$	$S_{xy}$
<b>Northern Basin 1997, 1998</b>					
10	2.3	-0.39 [1.11]	2.3454 [0.1194]	0.99	0.74
3	3.51	-2.24 [1.92]	3.7895 [0.2071]	0.99	1.28
1	4.61	-5.12 [2.58]	5.3088 [0.3554]	0.99	1.07
0.3	5.81	-9.16 [6.23]	7.2780 [0.9578]	0.98	1.83
<b>Midriff Islands 1995</b>					
10	2.3	0.45 [0.93]	2.2787 [0.1137]	0.99	0.31
3	3.51	2.56 [4.11]	3.3322 [0.4934]	0.95	1.19
1	4.61	5.6 [8.11]	4.2437 [0.9741]	0.89	2.36
0.3	5.81	16.46 [25.74]	4.2571 [3.4467]	0.54	4.16
<b>Midriff Islands 1995, 1997, 1998</b>					
10	2.3	1.86 [2.06]	2.0801 [0.2409]	0.95	0.76
3	3.51	6.57 [6.34]	2.7864 [0.7294]	0.82	2.09
1	4.61	20.85 [16.29]	2.3249 [1.8776]	0.34	5.35
0.3	5.81	28.09 [23.88]	2.5652 [2.7606]	0.34	5.75
<b>Southern Basins 1995, 1997, 1998</b>					
10	2.3	1.82 [2.19]	2.0840 [0.1888]	0.96	1.54
3	3.51	7.01 [5.97]	2.8364 [0.5140]	0.85	4.16
1	4.61	16.21 [9.24]	3.1268 [0.8302]	0.78	5.88
0.3	5.81	23.63 [17.93]	3.4796 [1.8304]	0.70	6.78

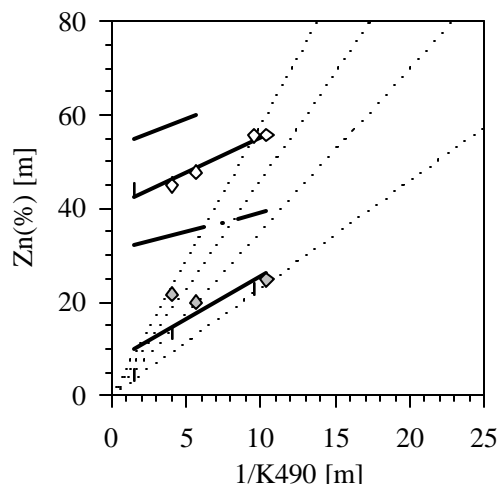
The regression lines  $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  and  $Z_{0.3\%}$ ) from table 1 are illustrated in figures 2, 3 and 4 for the northern basin, Midriff Islands and southern basins provinces, respectively. Also illustrated in each figure are the scatter in data at the  $Z_{10\%}$  and  $Z_{1\%}$  light levels. Scatter characteristics for the other two light depths are similar. The four dashed lines in each of these figures are the corresponding  $Z_{n\%}$  isolines for a vertically homogeneous water column.

Anomalous near-surface bio-optical conditions sometimes occur which do not fit the light attenuation models for the local province. On 10 March 1998, for example, the ship drifted approximately 4.5 km over a 2.5 hour period at a single station in a red-tide (*Mesodinium* sp.) bloom. This bloom was located in deep water near 26°N, 110.5°W in the southern basins province. Three PRR casts during this period yielded six  $K_d(490, z)$  profiles (down and up casts), which fit the  $Z_{n\%}$  regression models illustrated in figure 5. We do not list coefficient values for this special case, because they have no general application within the bio-optical province concept.  $1/K490$  varied between approximately 1 and 12 m in these six profiles and varied significantly in the few minutes between down and up casts (fig. 5). The dominant scales of spatial variability in bloom patch features appeared visually to be of the order of 100 m. The  $Z_{n\%}$  isolines in figure 5 are characteristic of a thin, extremely turbid layer overlying a more transparent water column; the intercepts are larger, and the slopes flatter, than the vertically homogeneous counterpart at each light depth (dotted lines in fig. 5). Each  $Z_{n\%}$  isoline would intersect its homogeneous counterpart at  $1/K490$  near 15 m.

Two hours later and 8 km away from the first red-tide station, an even more intense bloom patch with  $1/K490 < 1$  m was encountered. Here, light attenuation in the upper 3 to

identificaron tres provincias separadas: la cuenca norte (estaciones al norte de la Cuenca Delfín, fig. 1), la zona de las islas y umbral, y la cuenca sur. En la costa este de la plataforma continental hubo muy pocas estaciones (fig. 1) para considerar esa región como una provincia separada (provincia X en Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). Tampoco hubo suficiente número de estaciones en la porción sur de la provincia de la cuenca sur para separar la Cuenca de Guaymas del área global (provincias VIII, IX y XI en Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994). Los coeficientes de la regresión  $A_{n\%}$  y  $B_{n\%}$  de acuerdo con la ecuación (3) para los niveles de luz de 10%, 3%, 1% y 0.3% en cada provincia se presentan en la tabla 1. Los valores en paréntesis al lado de cada coeficiente son sus límites al 90% de CL. Todas las ecuaciones de la regresión son significativas al nivel de 0.995 de acuerdo con el criterio de la distribución  $F$  de Fisher, y en cada provincia los datos están bien distribuidos en el intervalo del ajuste. Con la excepción de  $Z_{0.3\%}$  en la ecuación para la provincia de la zona de las islas, todos los CL al 90% de la pendiente de la regresión  $B_{n\%}$  excluyen cero. También se calcularon los coeficientes de regresión para los datos en años particulares, aunque solamente se presentan en la tabla 1 los de 1995 de la zona de las islas. En otros casos donde hubo suficientes datos para un solo año se realizaron los análisis de regresión por separado, y la pendiente y los interceptos caen dentro de los CL al 90% del ajuste de la regresión global. Los coeficientes de regresión globales de la zona de las islas y la cuenca sur no son significativamente diferentes, de acuerdo con su CL al 90%, aunque los coeficientes de regresión de 1995 para la zona de las islas son significativamente diferentes en ambos.

Las líneas de regresión ( $Z_{10\%}$ ,  $Z_{3\%}$ ,  $Z_{1\%}$  y  $Z_{0.3\%}$ ) de la tabla 1 se presentan en las figuras 2, 3 y 4 para las provincias de la cuenca



**Figure 5.** The same as figure 2, but for the special case of a red-tide bloom of *Mesodinium rubrum* (Lohmann) observed near 26°N, 110.5°W on 10 March 1998.

**Figura 5.** Igual que la figura 2 pero para un caso especial de un florecimiento de marea roja de *Mesodinium rubrum* (Lohmann) que se observó cerca de 26°N, 110.5°W el 10 de marzo de 1998.

4m was too strong to be measured accurately with the PRR radiometer.

Linear regression coefficients,  $A_{n\%}$  and  $B_{n\%}$ , to predict euphotic zone depth from  $1/K490$  are listed in table 2 for the northern basin, Midriff Islands and southern basins provinces. These coefficients tune equation (3) for the three biogeographic regions and variations with time and year. All regressions are significant at the 0.995 level by Fisher's  $F$ -distribution criterion and, in each case, the data are well distributed over the range of the fit. The regression lines for the three bio-optical provinces, together with associated data scatter, are illustrated in figures 6, 7 and 8, respectively. In the Midriff Islands province, regression coefficients for the 1995 data are significantly different from those of the combined three-year sample at 90% CL (table 2, fig. 7). In the southern basins, separate sets of regression coefficients for each year are significantly different from each other and from the combined sample regression

norte, la zona de las islas y la cuenca sur, respectivamente. También se muestra en cada figura la dispersión de los datos a los niveles de luz de  $Z_{10\%}$  y  $Z_{1\%}$ . Las características de la dispersión para las otras dos profundidades de luz son similares. Las cuatro líneas punteadas en cada una de estas figuras son las correspondientes isóneas  $Z_{n\%}$  para una columna de agua verticalmente homogénea.

Algunas veces se presentaron condiciones bioópticas anómalas cerca de la superficie, las cuales no se ajustan a los modelos de atenuación de luz para la provincia local. El 10 de marzo de 1998, por ejemplo, mientras el barco derivaba aproximadamente a 4.5 km en un periodo de 2.5 horas, en una estación se muestreó un florecimiento de marea roja (*Mesodinium* sp. identificación preliminar). Este florecimiento estuvo localizado en agua profunda en 26°N, 110.5°W en la provincia de la cuenca sur. En este periodo se realizaron tres lances verticales de PRR equivalentes a seis



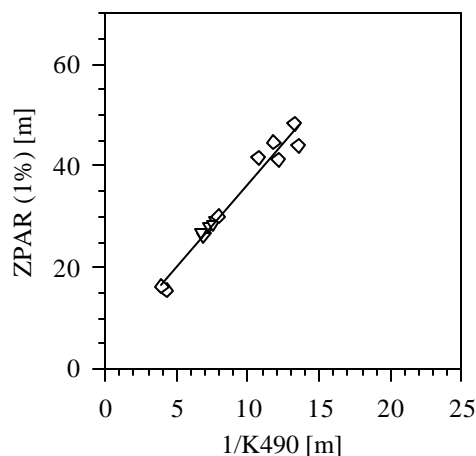
**Table 2.** Simple linear regression models giving the 1% attenuation depth,  $Z_{1\%}$  (meters), for  $E_{PAR}$  as functions of  $1/K_{490}$  (meters) in three provinces of the Gulf of California.  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $r$  and  $S_{xy}$  are the regression intercept, slope, correlation coefficient and standard error of regression, respectively. Values in square brackets are 90% confidence limits.

**Tabla 2.** Modelos de regresión lineal simple para la profundidad de atenuación del 1%,  $Z_{1\%}$  (metros), de  $E_{PAR}$  en función de  $1/K_{490}$  en tres provincias del Golfo de California.  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $r$  y  $S_{xy}$  son el intercepto, la pendiente, el coeficiente de correlación y el error estándar de la regresión, respectivamente. Los valores en los corchetes son los límites de confianza al 90%.

$A_n$	$B_n$	$r^2$	$S_{xy}$
<b>Northern Basin 1997, 1998</b>			
3.76 [2.97]	3.2697 [0.3197]	0.97	1.97
<b>Midriff Islands 1995</b>			
8.91 [2.94]	3.0486 [0.3543]	0.88	1.71
<b>Midriff Islands 1995, 1997, 1998</b>			
14.25 [4.08]	2.2922 [0.4700]	0.65	2.7
<b>Southern Basins 1995</b>			
13.73 [4.96]	2.6931 [0.5661]	0.73	3.39
<b>Southern Basins 1997</b>			
15.28 [6.52]	1.9754 [0.4767]	0.63	3.82
<b>Southern Basins 1998</b>			
9.41 [2.42]	2.7009 [0.2114]	0.95	2.57
<b>Southern Basins 1995, 1997, 1998</b>			
16.55 [2.46]	2.0473 [0.2122]	0.75	4.15

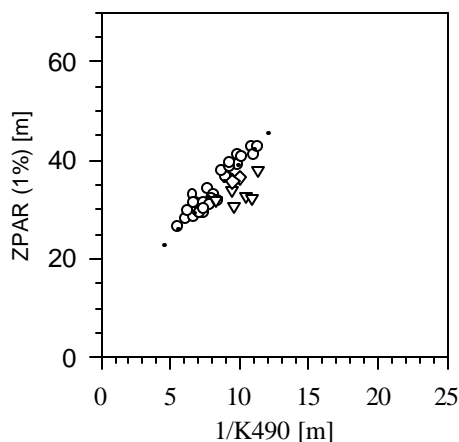
coefficients, at 90% CL (table 2, fig. 8). As with the 490 nm light attenuation models, the overall sample regressions for the Midriff Islands and southern basins are not significantly different at 90% CL, but both are significantly different from the 1995 results for the Midriff Islands, which also differ from individual year results in the southern basins.

perfiles (bajada y subida) de  $K_d(490, z)$ , los cuales se ajustaron al modelo de regresión  $Z_{n\%}$  presentado en la figura 5. Las escalas dominantes de variabilidad espacial en las características de los parches de los florecimientos, visualmente parecen del orden de 100 m. Las isolíneas  $Z_{n\%}$  en la figura 5 son características de una capa delgada, pero extremadamente



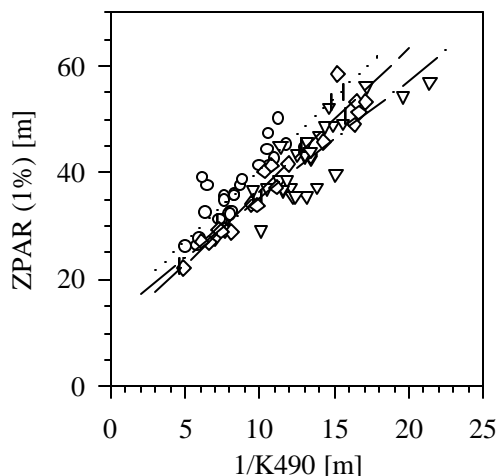
**Figure 6.** Scatter and the simple linear regression relationship between  $1/K490$  (meters) and  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  (meters), where  $E_{PAR}(z)$  is 1% of  $E_{PAR}(0^-)$ , for the northern basin province in 1997 (triangles) and 1998 (diamonds). We assume that  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  (meters) is approximately the depth of the euphotic zone. The solid line illustrates the regression line for the 1997 and 1998 data combined.

**Figura 6.** Dispersión y la relación de regresión lineal simple entre  $1/K490$  (metros) y  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  (metros), donde  $E_{PAR}(z)$  es 1% de  $E_{PAR}(0^-)$ , para la provincia de la cuenca norte en 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes). Se supone que  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  (metros) es aproximadamente la profundidad de la zona eufótica. La línea continua ilustra la línea de regresión para los datos combinados de 1997 y 1998.



**Figure 7.** The same as figure 6 but for the Midriff Islands province, in 1995 (circles), 1997 (triangles) and 1998 (diamonds). The dotted line illustrates the separate regression results for the 1995 data alone.

**Figura 7.** Igual que la figura 6 pero para la provincia de la zona de las islas, en 1995 (círculos), 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes). La línea punteada muestra los resultados de regresión sólo para los datos de 1995.



**Figure 8.** The same as figure 6 but for the province of the southern basins, in 1995 (circles), 1997 (triangles) and 1998 (diamonds). The three broken lines represent the separate regression models for 1995 (dot-dot), 1997 (dash-dot) and 1998 (dash-dash).

**Figura 8.** Igual que la figura 6 pero para la provincia de la cuenca sur, en 1995 (círculos), 1997 (triángulos) y 1998 (diamantes). Las tres líneas cortadas representan los modelos de regresión separados para 1995 (punto-punto), 1997 ((raya-punto) y 1998 (raya-rama).

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Variability in  $K_d(490, z)$  is strongly dependent on variability in absorption and weakly on variability in scattering. Throughout most of the Gulf of California, variation in scattering is dominated by concentrations of pigmented phytoplankton cells, but absorption is largely determined by phytoplankton pigments,  $a_c$ , and gilvin,  $a_g$ . The relative importance of  $a_g$  increases at lower chlorophyll concentrations and in the blue region. Even at 490 nm the  $a_g$  that Pegau *et al.* (1999) presented for the Gulf of California showed values comparable to  $a_c$ . The most important exception to this generalization occurs in the shallows at the extreme north of the northern basin province, where sediment resuspension is ubiquitous. Even here, nevertheless, there is a close association between absorption and chlorophyll

turbia sobre una columna de agua relativamente más transparente; los interceptos son mayores y las pendientes más aplanadas, respecto a su contraparte verticalmente homogénea de cada profundidad de luz (líneas punteadas en la fig. 5). Cada isolínea  $Z_{n\%}$  intersectaría su contraparte homogénea a  $1/K490$  cerca de los 15m.

Dos horas después y 8 km alejado de la primera estación de la marea roja, se registró un parche con un florecimiento aún más intenso, con  $1/K490 < 1$  m. Aquí, la atenuación de la luz en los primeros 3 a 4 m fue demasiado fuerte para ser medida con exactitud con el radiómetro PRR.

Los coeficientes de la regresión lineal,  $A_{n\%}$  y  $B_{n\%}$ , para predecir la profundidad de la zona eufótica a partir de  $1/K490$  de las provincias de la cuenca norte, zona de las islas y cuenca sur se presentan en la tabla 2. Estos coeficientes, de

concentration (Pegau *et al.*, 1999). Therefore, vertical stratification in  $K_d(490, z)$  is closely linked to the vertical chlorophyll distribution, which depends on the recent history of water column hydrography and ecology, with the time scales possibly ranging from diurnal to several weeks.

The depth of the euphotic zone is typically 2.5 to 3 times deeper than the remote sensing optical depth  $1/K490$  (figs. 6–8), and the depth at which  $E_d(490, z)$  is 1% of its surface value is typically 4 to 5 times deeper than  $1/K490$  m (figs. 2–4). The results presented in the previous section show that organized, statistically significant relationships occur linking variability in  $1/K490$  to variability in these much deeper light attenuation depths over spatial scales of more than 100 km and time scales longer than two weeks. In other words, as remotely sensed  $1/K490$  varies within an image derived from SeaWiFS ocean color data, the depth of the euphotic zone and depths of the deeper light levels in  $E_d(490, z)$  vary proportionally. The occurrence of these linear relationships implies that, within bio-optical provinces, phytoplankton populations must maintain a linear balance between light availability and chlorophyll concentration at each depth in the water column. By definition, this stable photoadaptive state varies between bio-optical provinces, and it may also vary on seasonal and annual time scales within a province.

At a given value of  $1/K490$ , each family of empirical models listed in table 1 and shown in figures 2–5 describes a particular structure in the vertical stratification of optical properties. In figures 2–5, a family of dotted lines passing through the origin illustrates the simple vertically homogeneous case, described previously. A value of  $Z_{n\%}$  falling below the homogeneous case  $n\%$  isolate means that the average value of  $K_d(490, z)$  in the interval between that depth and  $1/K490$  m exceeds  $K490$  (the layer is more

acuerdo con la ecuación (3) para las tres regiones biogeográficas, varían con la estación y con el año. Todas las regresiones son significativas al nivel de 0.995 de acuerdo con el criterio de la distribución  $F$  de Fisher y, en cada caso, los datos están bien distribuidos en el intervalo del ajuste. Las líneas de regresión para las tres provincias bioópticas, junto con la dispersión de los datos asociados, se presentan en las figuras 6, 7 y 8, respectivamente. En la provincia de la zona de las islas, los coeficientes de regresión para los datos de 1995 son significativamente diferentes de los de la combinación de muestras de tres años al 90% de CL (tabla 2, fig. 7). En la provincia de la cuenca sur, se presentan grupos separados de coeficientes de regresión para cada año significativamente diferentes entre ellos y en los coeficientes de regresión en muestras combinadas, al 90% de CL (tabla 2, fig. 8). Así como con los modelos de atenuación de luz a 490 nm, las regresiones globales para las provincias de la zona de las islas y la cuenca sur no son significativamente diferentes al 90% de CL; sin embargo, ambas son significativamente diferentes en los resultados de 1995 en la zona de las islas, las cuales también difieren de los resultados de años individuales en la cuenca sur.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La variabilidad en el  $K_d(490, z)$  depende fuertemente de la variabilidad en la absorción y débilmente de la variabilidad del esparcimiento. En la mayor parte del Golfo de California, la variación del esparcimiento está dominada por las concentraciones de las células de fitoplancton pigmentadas, en tanto que la absorción es ampliamente dominada por los pigmentos de fitoplancton,  $a_c$  y gilvin,  $a_g$ . La importancia relativa de  $a_g$  incrementa a bajas concentraciones de clorofila y en la región azul del espectro. Aun a 490 nm, la  $a_g$  que presentó Pegau *et al.* (1999) para el Golfo

turbid). Conversely, a value of  $Z_{n\%}$  falling above the homogeneous  $n\%$  isoline means that the water is more transparent below the remotely sensed 1/K490 layer. The anomalous red-tide case illustrated in figure 5 is an extreme example of a very turbid surface layer riding atop a relatively transparent water column.

In all provinces, the uncertainties in  $K_d(490, z)$  regression fits are least for the  $Z_{10\%}$  depths and increase progressively with deeper light levels. The least overall ( $1\sigma$ ) uncertainties occur in the northern basin and the largest in the southern basins (table 1,  $S_{xy}$  column). Uncertainties relative to the median  $Z_{1\%}$  depth in each province (figs. 2–4) range from approximately 4% in the northern basin to 11% in the southern basins.

In the northern basin province, the water column is almost optically homogeneous to the  $Z_{10\%}$  depth, whereas the models for the deeper  $Z_{n\%}$  levels all have slopes greater than for the homogeneous case, with corresponding isolines intersecting at 1/K490 between 6 and 8 m (table 1, fig. 2). In the most transparent case near 1/K490 = 14 m, elevated chlorophyll concentrations are confined to the upper 25–30 m in a surface mixed layer, with relatively clearwater below. At the turbid extreme where 1/K490 = 4 m, resuspension of sediments from the shallow sea floor in the northern end of the basin creates a turbidity gradient which increases with depth. Within the limits of the available data, the transition between these two extremes appears to be highly linear in the northern basin (fig. 2, table 1).

The Midriff Islands province can only be considered as a separate bio-optical province when represented by the 1995 data alone (table 1). When the 1997 and 1998 data points are combined with the 1995 sample, the regression coefficients are not significantly different than those for the southern basins province.

de California mostró valores comparables a  $a_c$ . La excepción más importante a esta generalización se presenta en la parte somera del extremo norte de la provincia de la cuenca norte donde la resuspensión de sedimentos es ubicua. Aun en esta zona, hay una cercana asociación entre la absorción y la concentración de clorofila (Pegau *et al.*, 1999). Por tanto, la estratificación vertical en  $K_d(490, z)$  está cercanamente relacionada con la distribución vertical de clorofila, la cual depende de la historia reciente de la hidrografía y la ecología de la columna de agua, con posibles escalas de tiempo en un intervalo de diurno a algunas semanas.

La profundidad de la zona eufótica es típicamente de 2.5 a 3 veces más profunda que la profundidad óptica registrada por los sensores remotos 1/K490 (figs. 6–8), y la profundidad a la cual  $E_d(490, z)$  es el 1% de su valor superficial es típicamente de 4 a 5 veces más profunda que 1/K490 m (figs. 2–4). Los resultados presentados en la sección anterior muestran estar organizados, con relaciones estadísticamente significativas que enlazan la variabilidad en 1/K490 con la variabilidad con las profundidades de atenuación de luz mucho más profundas en escalas de espacio de más de 100 km y en escalas de tiempo de dos semanas. En otras palabras, así como la variación en 1/K490 de sensores remotos varía dentro de una imagen de los datos del color del océano generada por el SeaWiFS, la profundidad de la zona eufótica y la profundidad de los niveles de luz más profundos en  $E_d(490, z)$  varían proporcionalmente. La presencia de estas relaciones lineales implica que, dentro de las provincias bio-ópticas, las poblaciones de fitoplancton deben mantener un balance lineal entre la disponibilidad de luz y la concentración de clorofila para cada profundidad en la columna de agua. Por definición, este estado fotoadaptativo estable varía entre las provincias bio-ópticas, y puede variar a escalas de tiempo estacional y anual dentro de cada provincia.

In the 1995 Midriff Islands province data set, several profiles were measured within a limited area (fig. 1) at different stages of the tide over several days. The range of  $1/K490$  varied between 5 and 12 m (fig. 3). The regression slopes are not significantly different from the homogeneous case at 90% CL, although the intercepts are different (table 1). Examination of figure 3 suggests that the water column was well mixed to the  $Z_{1\%}$  depth throughout the period when these data were acquired.

In the southern basins province (and Midriff Islands three-year composite sample), the slopes of regression lines are less than those of the corresponding isolines of the vertically homogeneous model, with intersections all occurring near  $1/K490 = 10$  m (table 1, fig. 4). This tendency is opposite that found in the northern basin (fig. 2), and is consistent with the following qualitative interpretation. At the turbid extreme,  $1/K490 = 5$  m, elevated chlorophyll concentrations are confined to a surface mixed layer. As  $1/K490$  increases between 5 and 10 m, the surface mixed layer deepens and the water column becomes more homogeneous. In water masses where  $1/K490 > 10$  m, the lower water column becomes relatively more turbid as a subsurface chlorophyll maximum develops and moves progressively deeper as  $1/K490$  increases. A similar argument can be made based on the absorption coefficients of gilvin that contribute significantly to the attenuation of daylight in the visible spectrum or at 490 nm (Pegau *et al.*, 1999). In a stratified water column with a deep euphotic zone, the near surface water would have lower gilvin absorption at 490 nm because of daylight bleaching of gilvin. The bleached, reduced gilvin concentration probably does not reach to the depth of 1%  $E_d490$  and, therefore, the 1%  $E_d490$  would be shallower than expected from the surface  $1/K490$ .

Comparisons between the regression slopes for the Gulf of California province (table 1) and

Para un valor determinado de  $1/K490$ , cada familia de modelos empíricos presentados en la tabla 1 y mostrados en las figuras 2 a 5, describe una estructura particular en la estratificación vertical de las propiedades ópticas. En las figuras 2 a 5, una familia de líneas punteadas que pasan a través del origen ilustra el caso simple verticalmente homogéneo, descrito anteriormente. Un valor de  $Z_{n\%}$  que cae debajo de la isolínea del caso  $n\%$  homogéneo significa que el valor promedio de  $K_d(490, z)$  en el intervalo entre esa profundidad y  $1/K490$  m excede  $K490$  (la capa es más turbia). Contrariamente, un valor de  $Z_{n\%}$  que cae arriba de la isolínea del caso  $n\%$  homogéneo significa que el agua es más transparente debajo de la capa  $1/K490$  registrada por sensores remotos. El caso anómalo de mareas rojas ilustrado en la figura 5 es un ejemplo extremo de una capa superficial muy turbia por arriba de una columna de agua relativamente transparente.

En todas las provincias, la incertidumbre en los ajustes de las regresiones de  $K_d(490, z)$  es mínima para las profundidades  $Z_{10\%}$  y se incrementa progresivamente con los niveles de luz más profundos. Son mínimas las incertidumbres globales ( $1\sigma$ ) que se presentan en la cuenca norte y aumentan en la cuenca sur (tabla 1, columna  $S_{xy}$ ). La incertidumbre relativa a la mediana a una profundidad  $Z_{1\%}$  en cada provincia (figs. 2–4) varía en un intervalo de aproximadamente 4% en la cuenca norte a 11% en la cuenca sur.

En la provincia de la cuenca norte, la columna de agua es casi homogénea ópticamente a la profundidad  $Z_{10\%}$ , mientras que en los modelos para los niveles  $Z_{n\%}$  más profundos, todos presentan pendientes mayores que para el caso homogéneo, con correspondientes isolíneas intersectando a  $1/K490$  entre 6 y 8m (tabla 1, fig. 2). En el caso más transparente,  $1/K490 = 14$  m, se presentan concentraciones elevadas de clorofila confinadas a los

those reported for the California Current System (CCS;  $1/K490 < 20$  m cases) by Mueller and Lang (1989), show no significant differences in all cases at the 10% light level. The northern basin and CCS slopes are significantly different, but the Midriff Islands, southern basins and CCS (October/November) slopes are not, at the 3% light level. In all cases, the slopes for Gulf of California provinces are significantly different from those for the CCS at the 1% light level.

The empirical algorithms listed in table 2 may be used with remotely sensed  $1/K490$  images to estimate the depth of the euphotic zone, approximated here by the 1% depth for  $E_{PAR}(z)$ . For the multi-year results, ( $1\sigma$ ) uncertainties range from approximately 2 m in the northern basin to 4 m in the southern basins. These uncertainties are approximately 6% and 10%, respectively, relative to the median euphotic depths in each province (figs. 6, 8). Significant improvements in uncertainty accrue when individual cruise results are used for the southern basins and for the 1995 data in the Midriff Islands (table 2; figs. 7, 8). Because the cruises were all staged in different months, as well as different years, both seasonal and interannual sources of variability may contribute to differences in the regression results obtained here.

Stratification in the vertical distribution of optical properties almost certainly plays an important role in forming the slopes of the  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  versus  $1/K490$  relationships in each province. However, integration over the wavelength dependent attenuation of  $E_d(PAR, z)$  by water and its constituents also varies with depth in a way that is dependent on chlorophyll concentration. There is no simple, intuitive, vertically homogeneous case with which to compare the euphotic depth predictions. We therefore simply present table 2 and figures 6–8 as empirical algorithms which

primeros 25–30 m en una capa de mezcla superficial, con agua relativamente clara por debajo. En el extremo turbio donde  $1/K490 = 4$ m, la resuspensión de sedimentos en áreas someras en el extremo norte de la cuenca crea un gradiente de turbidez que se incrementa con la profundidad. Dentro de los límites de la disponibilidad de datos, la transición entre estos dos extremos parece ser altamente lineal en la cuenca norte (fig. 2, tabla 1).

La provincia de la zona de las islas sólo puede ser considerada como una provincia bio-óptica separada cuando es representada únicamente por los datos de 1995 (tabla 1). Cuando los datos de 1997 y 1998 son combinados con las muestras de 1995, los coeficientes de regresión no son significativamente diferentes que los de la provincia de la cuenca sur.

En el grupo de datos de la provincia de la zona de las islas, algunos perfiles fueron medidos dentro de un área limitada (fig. 1) en diferentes estadios de la marea durante algunos días. El intervalo de  $1/K490$  varió entre 5 y 12m (fig. 3). Las pendientes de la regresión no son significativamente diferentes del caso homogéneo al 90% de CL, aunque los interceptos son diferentes (tabla 1). El análisis de la figura 3 sugiere que la columna de agua estuvo bien mezclada a la profundidad de  $Z_{1\%}$  en todo el periodo de toma de datos.

En la provincia de la cuenca sur (y la zona de las islas en una composición de tres años), las pendientes de las líneas de regresión son menores que las isolíneas correspondientes al modelo verticalmente homogéneo, con todas las intersecciones cerca de  $1/K490 = 10$  m (tabla 1, fig. 4). Esta tendencia es opuesta a la encontrada en la cuenca norte (fig. 2) y es consistente con la siguiente interpretación cualitativa. Hacia el extremo turbio,  $1/K490 = 5$  m, se encuentran elevadas concentraciones de clorofila que están confinadas a una capa de mezcla superficial. Con un incremento de

should be useful in applying euphotic zone depth estimates from satellite ocean color imagery to, e.g., primary productivity models for the Gulf of California.

An obvious next step will be to compare the euphotic zone depth predictions given here (table 2) with the independently derived prediction equations of Barnard *et al.* (1999), which are based on different measurements obtained using a separate radiometer system. This comparison would not be difficult, but it is beyond the scope of the present paper. Their data were taken from two different cruises, together with only one of the cruises we have analyzed here (March 1998). Once the data from the overlapping cruise were cross-matched, it would be straightforward to estimate profiles of  $\tau(490, z)$  from  $1/K490$  using equation (3) with coefficients from table 1. Then, the Barnard *et al.* (1999) polynomial could be used to convert from  $\tau(490, z)$  to  $\tau_{PAR}(490, z)$ , and the depth  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  determined as the depth where  $\tau_{PAR}(490, Z_{1\%}) = 4.61$ . In this context, it is noteworthy that  $E_d(PAR, z)$  is attenuated much more rapidly than is  $E_d(490, z)$ . By comparing figures 2 and 6, 3 and 7, and 4 and 8, it is apparent that  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  corresponds approximately to  $Z_{3\%}(490)$ , where uncertainties in the models of table 1 range from approximately 1.5 to 4 m. This at least partially explains why, even though uncertainties in  $Z_{1\%}(490)$  range from 1 to 6 m, uncertainties in  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  only range from 1.5 to 4 m (table 2). Barnard *et al.* (1999) found uncertainties for  $Z_{1\%}(PAR)$  comparable to those in table 2.

This paper reports empirical equations that may be used with K490 images derived from SeaWiFS ocean color data to map the depth of the euphotic zone, as well as three-dimensional maps showing structure in vertical profiles of light attenuation down to the depth where  $E_d(490, z)$  is only 0.3% of its surface value. Separate algorithms are given in tables 1 and 2

$1/K490$  entre 5 y 10 m, la capa de mezcla superficial es más profunda y la columna de agua se hace más homogénea. En la masa de agua donde  $1/K490 > 10$  m, la columna de agua es menos profunda y se hace relativamente más turbia con el desarrollo de un máximo de clorofila subsuperficial y se vuelve progresivamente más profundo al incrementarse  $1/K490$ . Un argumento similar puede estar basado en los coeficientes de absorción de gilvin que contribuyen significativamente a la atenuación de la luz en el espectro visible a 490nm (Pegau *et al.*, 1999). En una columna de agua estratificada con una zona eufótica profunda, el agua cerca de la superficie podría tener menor absorción de gilvin a 490 nm debido al blanqueamiento de gilvin por la luz. El blanqueamiento reduce la concentración de gilvin y probablemente no alcanza la profundidad del 1% de  $E_d490$  y, por tanto, el 1% de  $E_d490$  sería más somero que el esperado a partir del  $1/K490$  de la superficie.

Las comparaciones entre las pendientes de regresión de las provincias del Golfo de California (tabla 1) y las reportadas para el sistema de la Corriente de California (CCS; casos  $1/K490 < 20$  m) por Mueller y Lang (1989), no muestran diferencias significativas en todos los casos al nivel de 10% de luz. Las pendientes de la cuenca norte y la CCS son significativamente diferentes, pero las pendientes de la zona de las islas, la cuenca sur y la CCS (octubre/noviembre) no lo son, al nivel de 3% de luz. En todos los casos, las pendientes para las provincias del Golfo de California son significativamente diferentes de las del CCS al nivel de 1% de luz.

Los algoritmos empíricos presentados en la tabla 2 pueden ser usados con  $1/K490$  de las imágenes de sensores remotos para estimar la profundidad de la zona eufótica; en este trabajo la profundidad es aproximada al 1% de  $E_{PAR}(z)$ . Para los resultados multianuales, el intervalo de



for up to five bio-optical provinces, corresponding spatially to three geographic regions in the gulf, but with separate algorithms given for different time periods in two of the biogeographic provinces. The present results can also be combined with those of Barnard *et al.* (1999) to map structure in the vertical profiles of PAR from SeaWiFS K490 images. This type of information can be used, together with regional photosynthetic parameters, to derive three-dimensional models of primary productivity throughout the Gulf of California.

The present results show relatively large variability between different time periods in the gulf, except in the northern basin, which contributes strongly to the relatively large uncertainties in euphotic depth and vertical K490 structure predictions based on table 1. Clearly, improved confidence and uncertainty levels would result if seasonally concurrent cruise data were used to tune the coefficients for each region. A viable strategy would be to stage seasonal cruises in the Gulf of California to acquire spectral irradiance and PAR profiles at a well-distributed set of stations. These data would then be used to tune the model coefficients, which would then be applied to the satellite K490 image data to obtain improved, seasonally adjusted, time-series estimates of the light attenuation profiles and euphotic zone depth throughout the gulf.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

In pursuing the research leading to this paper, the authors were supported at SDSU-CHORS by NASA under SIMBIOS contract NAS5-97126, by a CICIMAR-IPN and CONACYT sabbatical at SDSU CHORS (first author), and by CICESE institutional resources. Ship time was provided by CICESE, using institutional resources. We are grateful to the

incertidumbre ( $1 \sigma$ ) es de aproximadamente 2m en la cuenca norte a 4 m en la cuenca sur. Estas incertidumbres son aproximadamente 6% y 10%, respectivamente, relativo a la mediana de la profundidad de la zona eufótica en cada provincia (figs. 6, 8). Se obtienen mejoramientos significativos en las incertidumbres cuando se utilizan los resultados de los cruceros individuales para los datos de 1995 en la zona de las islas (tabla 2; figs. 7, 8). Ya que los cruceros fueron realizados en diferentes meses y en diferentes años, ambas fuentes de variabilidad estacional e interanual pueden contribuir a las diferencias en los resultados de la regresión obtenidos.

La estratificación en la distribución vertical de las propiedades ópticas ciertamente juega un papel importante en la formación de las pendientes de las relaciones de  $Z_{1\%}(E_{PAR})$  versus  $1/K490$  en cada provincia. Sin embargo, la integración de la dependencia de la longitud de onda de atenuación de  $E_{PAR}(z)$  por el agua y sus constituyentes también varía con la profundidad en una forma en la que depende de la concentración de clorofila. No hay un caso simple, intuitivo, verticalmente homogéneo con el cual comparar las predicciones de la profundidad de la zona eufótica. Por lo tanto, simplemente presentamos la tabla 2 y las figuras 6 a 8 como algoritmos empíricos que pueden ser útiles en la aplicación de las estimaciones de la profundidad de la zona eufótica a partir de las imágenes de satélite del color del océano, e.g., modelos de productividad primaria para el Golfo de California.

El siguiente paso será comparar la predicción de la profundidad de la zona eufótica presentada (tabla 2) con las ecuaciones de predicción obtenidas de manera independiente por Barnard *et al.* (1999), las cuales están basadas en diferentes mediciones con un sistema de radiómetros por separado. Esta comparación no será difícil, aunque rebasa los objetivos del

officers and crew of the R/V *El Puma* and the R/V *Francisco de Ulloa* for their support and assistance in carrying out the cruises reported here.

## REFERENCES

- Allen, W.E. (1937). Plankton diatoms of the Gulf of California obtained by the G. Allan Hancock Expedition of 1936. Hancock Pacific Exped., Publ. 3, pp. 47–59.
- Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. In: B.H. Ketchum (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier, New York, pp. 427–449.
- Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F. and Hunter, J.R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100: 16103–16118.
- Austin, R.W. and Petzold, T. (1981). The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the Coastal Zone Color Scanner. In: J.F.R. Gower (ed.), *Oceanography from Space*. Plenum, pp. 239–256.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C.J. and Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta*, 8: 13–22.
- Barnard, A.H., Zaneveld, J.R.V., Pegau, W.S., Mueller, J.L. and Trees, C.C. (1998). SeaWiFS ocean color in the Gulf of California: Validation. In: *Ocean Optics XIII*, Proc. SPIE, compact disc.
- Barnard, A.H., Zaneveld, J.R.V., Pegau, W.S., Mueller, J.L., Maske, H., Lara-Lara, R., Álvarez-Borrego, S., Cervantes-Duarte, R. and Valdez-Holguín, E. (1999). The determination of PAR levels from absorption coefficient profiles at 490 nm. *Ciencias Marinas*, 25(4): 487–507.
- Baumgartner, T., Ferreira-Bartrina, V., Schrader, H. and Soutar, A. (1985). A 20 year varve record of siliceous phytoplankton variability in the central Gulf of California. *Mar. Geol.*, 64: 113–129.
- Bray, N.A. and Robles, J.M. (1991). Physical oceanography of the Gulf of California. In: B.R.T. Simoneit and J.P. Dauphin (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. AAPG Mem., 47: 511–553.
- presente trabajo. Sus datos fueron tomados de dos diferentes cruceros, junto con uno de los cruceros que analizamos (marzo de 1998). Una vez que los datos del crucero común sean conjuntados, se estimará directamente de los perfiles de  $\tau(490, z)$  a partir de  $1/K_{490}$  utilizando la ecuación (3) con los coeficientes de la tabla 1. Luego, la polinomial de Barnard *et al.* (1999) puede ser utilizada para convertir de  $\tau(490, z)$  a  $\tau_{\text{PAR}}(490, z)$ , y determinar la profundidad  $Z_{1\%}(E_{\text{PAR}})$  así como la profundidad donde  $\tau_{\text{PAR}}(490, Z_{1\%}) = 4.61$ . En este contexto, es notable que  $E_{\text{PAR}}(z)$  es atenuada mucho más rápidamente que  $E_d(490, z)$ . Comparando las figuras 2 y 6, 3 y 7, y 4 y 8, es aparente que  $Z_{1\%}(E_{\text{PAR}})$  corresponde aproximadamente a  $Z_{3\%}(490)$ , donde la incertidumbre de los modelos de la tabla 1 tiene un intervalo de aproximadamente 1.5 a 4 m. Esto al menos explica parcialmente por qué, aunque la incertidumbre en  $Z_{1\%}(490)$  se encuentra en un intervalo de 1 a 6 m, en  $Z_{1\%}(E_{\text{PAR}})$  la incertidumbre es sólo de 1.5 a 4 m (tabla 2). Barnard *et al.* (1999) mencionan incertidumbres para  $Z_{1\%}(\text{PAR})$  comparables a las de la tabla 2.
- En este trabajo se reportan las ecuaciones empíricas que pueden ser utilizadas con imágenes de K490 obtenidas a partir de datos del color del océano del SeaWiFS para trazar la profundidad de la zona eufótica, así como elaborar mapas en tres dimensiones que muestren la estructura de los perfiles verticales de la atenuación de luz con la profundidad donde  $E_d(490, z)$  es de sólo 0.3% del valor superficial. Se presentan en las tablas 1 y 2 los algoritmos por separado de cinco provincias bioópticas, que corresponden espacialmente a tres regiones geográficas en el golfo, aunque en diferentes épocas se presentan algoritmos separados en dos de las provincias biogeográficas. Estos resultados pueden ser combinados con los de Barnard *et al.* (1999) para trazar la

- Fu, L.L. and Holt, B. (1984). Internal waves in the Gulf of California: Observations from a space-borne radar, *J. Geophys. Res.*, 89: 2053–2060.
- Gilbert, J.Y. and Allen, W.E. (1943). The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the *E.W. Scripps* in 1939 and 1940. *J. Mar. Res.*, 5: 89–110.
- Gordon, H.R. and McCluney, W.R. (1975). Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Opt.*, 14: 413–416.
- Kirk, J.T.O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 509 pp.
- Lavín, M.F., Beier, E. y Badan, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: M.F. Lavín (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monogr. No. 3, Unión Geofísica Mexicana, pp. 141–171.
- Mueller, J.L. (1995). An integral method for analyzing irradiance and radiance attenuation profiles. In: *Results of the SeaWiFS Data Analysis Round-Robin, July 1994 (DARR-94)*. NASA Tech. Memo. 104566, SeaWiFS Tech. Rep. Ser., Vol. 26, pp. 44–52.
- Mueller, J.L. and Lang, E. (1989). Bio-optical provinces of the NE Pacific Ocean: A provisional analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 34: 1572–1586.
- Mueller, J.L. and Austin, R.W. (1995). *Ocean Optical Protocols for SeaWiFS Validation, Revision 1*. NASA Tech. Memo. 104566, SeaWiFS Tech. Rep. Ser., Vol. 25.
- Mueller, J.L. and Trees, C.C. (1997). Revised SeaWiFS prelaunch algorithm for the diffuse attenuation coefficient K(490). In: *Case Studies for SeaWiFS Calibration and Validation. Part 4*. SeaWiFS Tech. Rep. Ser., Vol. 41, pp. 18–21.
- Paden, C.A., Abbott, M.R. and Winant, C.D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. 1. Sea surface temperature variability. *J. Geophys. Res.*, 99: 18337–18359.
- Pegau, W.S., Barnard, A.H., Zaneveld, J.R.V., Mueller, J.L., Maske, H., Lara-Lara, R., Álvarez-Borrego, S., Valdez-Holguín, E. and Cervantes-Duarte, R. (1998). Optical variability in the Gulf of California. In: *Ocean Optics XIII*, Proc. SPIE, compact disc.
- estructura de los perfiles verticales de PAR a partir de las imágenes de K490 del SeaWiFS. Este tipo de información puede ser utilizada, junto con los parámetros fotosintéticos regionales, para elaborar modelos en tres dimensiones de productividad primaria en todo el Golfo de California. Estos resultados muestran una variabilidad relativamente grande entre diferentes periodos de tiempo en el golfo, excepto en la cuenca norte, la cual contribuye fuertemente a la relativamente gran incertidumbre de las predicciones de la profundidad eufótica y estructura vertical de K490 basada en la tabla 1. Claramente, se obtendrán mejores niveles de confianza e incertidumbres si se usaran datos de cruceros concurrentes estacionalmente para afinar los coeficientes de cada región. Una estrategia viable sería establecer cruceros estacionales en el Golfo de California para obtener perfiles de irradiancia espectral y PAR en un número de estaciones bien distribuidas. Estos datos luego serían utilizados para afinar los coeficientes del modelo, que luego se aplicarían a los datos de la imagen de satélite K490 para obtener mejores estimaciones de series de tiempo, ajustadas estacionalmente, de los perfiles de atenuación de luz y la profundidad de la zona eufótica en todo el golfo.

#### AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de esta investigación los autores fueron apoyados por SDSU-CHORS y NASA, mediante el contrato NAS5-97126 SIMBIOS, y por las instituciones CONACYT y CICIMAR-IPN, mediante el sabático en SDSU-CHORS del primer autor. Se agradece a la tripulación del B/O *El Puma* y del B/O *Francisco de Ulloa* su apoyo y asistencia durante los cruceros.

Traducido al español por los autores.

- Pegau, W.S., Zaneveld, J.R.V., Barnard, A.H., Maske, H., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, R. and Cervantes-Duarte, R. (1999). Inherent optical properties in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(4): 469–485.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: T.H. van Andel and G.G. Shor, Jr. (eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*. Mem. Am. Assoc. Petroleum Geologists, 3: 30–58.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959) Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18: 10–35.
- Round, F.E., (1967). The phytoplankton of the Gulf of California. I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 1: 76–97.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994a). Gulf of California biogeographic regions based on Coastal Zone Color Scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7411–7421.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994b). The 1982–1984 El Niño in the Gulf of California as seen in Coastal Zone Color Scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7423–7431.
- Shepard, F.P. (1950). Submarine topography of the Gulf of California. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 43: 32pp.
- Simpson, J.H., Souza, A.J. and Lavín, M.F. (1994). Tidal mixing in the Gulf of California. In: K.J. Beven, P.C. Chatwin and J.H. Millbank (eds.), *Mixing and Transport in the Environment*. John Wiley, London, pp. 169–182.
- Thunell, R.C., Pride, C.J., Tappa, E. and Muller-Karger, F.E. (1994). Biogenic silica fluxes and accumulation rates in the Gulf of California. *Geology*, 22: 303–306.
- Zaneveld, J.R.V., Kitchen, J.C. and Mueller, J.L. (1993). The vertical structure of productivity and its vertical integration as derived from remotely sensed observations. *Limnol. Oceanogr.*, 38: 1384–1393.