

# Modelo Físico de la Estimación de la Concentración de Clorofila-a en el Mar usando Imágenes MODIS

Joel Rojas Acuña<sup>1</sup>  
Rosa Inés Paredes Peñafiel<sup>1</sup>,  
María Giuliana Quezada García<sup>1</sup>  
Flavio Carrillo Gomero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos - UNMSM  
Av. Venezuela s/n. Pabellón de Física. Ciudad Universitaria, Lima 1.  
<sup>1</sup>jrojas@unmsm.edu.pe

**Resumen.** La clorofila-a es un indicador de la biomasa del plancton y se utiliza como una entrada a los modelos de producción primaria o para rastrear corrientes, chorros y plumas oceanográficas. La clorofila-a de la superficie del mar peruano puede ser medida mediante teledetección por satélite en el rango espectral del visible (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ). El objetivo de este trabajo es desarrollar el modelo físico para la estimación de la concentración de la clorofila-a procedente de las imágenes MODIS en el mar peruano.

Palabras claves: Clorofila, imágenes por satélite, MODIS, Oceanografía.

**Abstract.** The chlorophyll is an indicator of the plankton biomass and is used as a primary production or to track flows, jets and oceanographic feathers entry models. The chlorophyll in the Peruvian sea surface can be measured by means of satellite remote sensing in the visible spectral range (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ). This work aims to develop the physical model for the estimation of the MODIS images from chlorophyll concentration in the Peruvian sea.

Key words: chlorophyll, satellite images, MODIS, Oceanography.

## 1. Introducción

La teledetección del color del océano produce información sobre los constituyentes del agua del mar tal como la concentración de pigmentos de fitoplancton, sedimentos suspendidos y sustancia amarilla. Los métodos de detección y mapeado de los constituyentes del agua del mar desde aviones y satélites han sido desarrolladas exitosamente durante las últimas tres décadas. El monitoreo rutinario de la variabilidad regional y temporal proporciona información de la clorofila del océano sobre producción primaria y subsiguiente evaluación de los procesos de producción secundarios y mayores ordenes tal como zooplancton y pesca marina. La clorofila-a es un indicador de la biomasa del plancton y se utiliza como una entrada a los modelos de producción primaria o para rastrear corrientes, chorros y plumas oceanográficas. La concentración de clorofila-a en una muestra de agua permite una estimación de la concentración de fitoplancton e, indirectamente, de la actividad biológica. Los organismos que contienen clorofila-a se encuentra en la base de la cadena alimenticia, por lo que la determinación de concentraciones de clorofila-a es uno de los índices claves de monitoreo de la población de fitoplancton y de la salud de nuestro sistema natural. La clorofila-a de la superficie del mar peruano puede ser medida mediante teledetección por satélite en el rango espectral del visible. El objetivo de este

trabajo es desarrollar el modelo físico para la estimación de la concentración de la clorofila-a procedente de las imágenes MODIS en el mar.

## II. Fundamento Teórico

### 2.1 Visión General

El algoritmo de la clorofila-a Caso 2 esta basado en un modelo bio-óptico semi-analítico de la reflectancia de sensoramiento remoto,  $R_{rs}(\lambda)$ . La reflectancia  $[R_{rs}(\lambda)]$  está definida como la radiancia que sale del agua,  $L_w(\lambda)$ , dividido por la irradiancia que incide sobre la superficie del mar  $E_d(\lambda, 0^+)$ . El modelo  $R_{rs}(\lambda)$  describe un algoritmo que tiene dos variables libres, el coeficiente de absorción debido al fitoplancton en 675 nm,  $a_\phi(675)$ , y el coeficiente de absorción debido a la material orgánico disuelto (CDOM) o gelbstoff a 400 nm,  $a_g(400)$ . Los valores de  $R_{rs}(\lambda_i)$  del sistema de procesamiento de datos MODIS son ingresados en el modelo, el modelo es invertido, y se calculan  $a_\phi(675)$ ,  $a_g(400)$ , y la clorofila-a. El algoritmo también produce los coeficientes de absorción total,  $a(\lambda_i)$ , y permite el cálculo de los coeficientes de absorción del fitoplancton,  $a_\phi(\lambda_i)$ , basado en la recuperación de  $a_\phi(675)$ . Estos son utilizados para el cálculo de la radiación absorbida por el fitoplancton para usarse en el cálculo de eficiencia de fluorescencia de la clorofila.

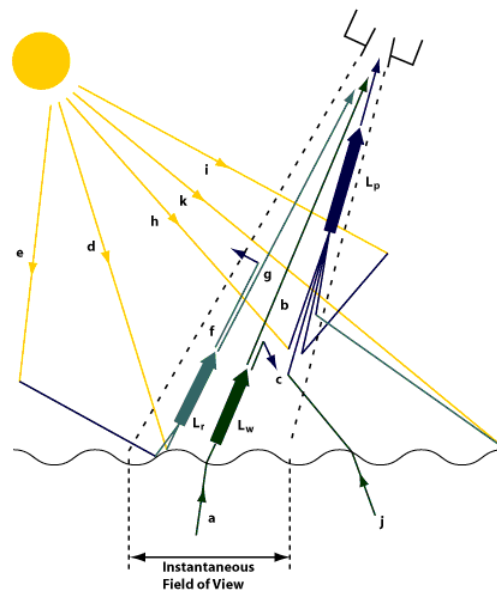


Figura 1 – Modelo bio-óptico semi-analítico de la reflectancia de sensoramiento remoto [1].

El algoritmo requiere como entrada la radiancia que sale del agua,  $L_w$ , en las bandas del MODIS para ondas oceánicas con longitud de ondas centradas en 412, 443, 488, y 551 nm y los dominios bio-ópticos están diseñados sobre la base de la temperatura superficial del mar, que es un producto obtenido del MODIS. La reflectancia,  $R_{rs}$ , es obtenida de la radiancia que sale del agua,  $L_w$ , como:

$$R_{rs} = \frac{L_w}{F_0 t_d \cos \theta},$$

donde  $F_0$  es la irradiancia solar extraterrestre,  $\theta$  es el ángulo cenit del Sol, y  $t_d$  es el transmitancia de la luz a través de la zona de interacción mar-aire. La resolución de 1000 m, nuevas bandas espectrales, y la cobertura diaria del MODIS permite la observación de las características oceanográficas de mesoescala en entornos costeros y estuarios, áreas muy importantes en muchos estudios de las ciencias marinas además de las tradicionales observaciones del océano abierto. En la Figura 1, se ilustran los diferentes caminos de luz en la atmósfera. (a) El camino de luz de la radiancia que sale del agua, (b) la atenuación de la radiancia que sale del agua, (c) la dispersión de la radiancia que sale del agua en el campo de visión del sensor, (d) reflexión de la superficie del agua, (e) luz dispersada reflejada de la superficie. (f) dispersión de la luz dispersada fuera del campo de visión del sensor, (g) luz reflejada es también atenuada hacia el sensor, (h) luz dispersada del sol que es dirigida al sensor, (i) radiancia que sale del agua originada fuera del campo de visión del sensor, pero dispersada al sensor, (j) reflexión de la superficie fuera del campo de visión del sensor que es entonces dispersada hacia el sensor.  $L_w$  radiancia total que sale del agua,  $L_r$  radiancia arriba de la superficie del mar debido a todos los efectos de la reflexión dentro del campo de visión instantánea.  $L_p$  radiancia de camino atmosférica (Robinson, 1983; Carder et al. 2003; Carder et al. 1999).

## 2.2 Descripción Teórica

### (a) Física del Problema

Después de que la luz ingresa al océano, algo de esto eventualmente dispersa hacia atrás subiendo a través de la superficie. Esta luz es llamada la radiancia que sale del agua,  $L_w(\lambda)$ , y puede ser deducido desde el espacio después de eliminar los efectos atmosféricos. La magnitud, variación espectral, y distribución angular de esta radiancia depende de los siguientes factores: los coeficientes de dispersión y absorción del agua del mar,  $a(\lambda)$  y  $b_b(\lambda)$ , respectivamente (conocidos como las propiedades ópticas inherentes); la irradiancia incidente sobre la superficie del mar  $E_d(\lambda, 0^+)$ ; y la distribución angular de la luz dentro del océano. Para que las cosas sean más fáciles, se divide el agua del mar en tres componentes, cada uno tiene distintas propiedades ópticas. Estas componentes son el agua de mar mismo (agua y sales), la fracción de partículas, y la fracción disuelta. Afortunadamente,  $a(\lambda)$  es simplemente igual a la suma de los coeficientes de absorción para cada componente, y  $b_b(\lambda)$  es igual a la suma de los coeficientes de retrodispersión. Si se puede describir o modelar exactamente cada componente distinto espectralmente de los coeficientes de absorción y retrodispersión, entonces se puede determinar la magnitud de cada uno de las mediciones de  $L_w(\lambda)$  y  $E_d(\lambda, 0^+)$ , dado algunas suposiciones acerca de las distribución angular de la luz en el agua. La clave aquí es modelar exactamente el comportamiento espectral de  $a(\lambda)$  para cada componente. En cambio el comportamiento espectral de  $b_b(\lambda)$  no es tan dinámico.

### (b) Modelo de la Reflectancia de Sensoramiento Remoto, $R_{rs}$

El modelo de reflectancia  $R_{rs}$  esta dado por la siguiente ecuación general:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{ft^2}{Q(\lambda)n^2} \frac{b_b(\lambda)}{[a(\lambda) + b_b(\lambda)]} \quad (1)$$

dónde  $f$  es un factor empírico (0.32-0.33),  $t$  es la transmitancia de la zona de interacción mar-aire,  $Q(\lambda)$  es la razón entre la irradiancia y la radiancia hacia arriba  $E_u(\lambda)/L_u(\lambda)$ , y  $n$  es la parte real del índice de la refracción de agua de mar. Al hacer tres aproximaciones, la ecuación (1) puede ser simplificada enormemente: 1) Se asume que  $f/Q$  es independiente de  $\lambda$  y  $\theta_0$  para todas las bandas MODIS de interés; 2) el término  $t^2/n^2$  es aproximadamente igual a 0.54; 3)  $b_b(\lambda)$  es mucho más pequeña que  $a(\lambda)$  y puede así ser eliminado del denominador de ecuación 1. Estas tres aproximaciones conducen a la versión simplificada de la ecuación (1):

$$R_{rs}(\lambda) \approx \text{constante} \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (2)$$

donde el término “constante” no cambia con respecto a  $\lambda$  y  $\theta_0$ . El valor de la constante no es relevante para el algoritmo ya que el algoritmo usa razones espectrales de  $R_{rs}(\lambda)$  y el término constante se factoriza. Los términos  $b_b(\lambda)$  y  $a(\lambda)$  será dividido en varios términos separados. Cada término será descrito empíricamente. Las ecuaciones son escritas en una forma general – es decir, los parámetros obtenidos empíricamente que describe cada término son escritos como variables – y los valores actuales de los parámetros que son usados en el algoritmo son mostrados en las Tablas 2a y 2b.

Tabla 2a – Parámetros que dependen de la longitud de onda para el algoritmo clorofila semi-analítico para regiones sin pigmentos empaquetados.

$\lambda$	412	443	488	551
$b_b(m^{-1})$	0.003341	0.002406	0.001563	0.000929
$a_w(m^{-1})$	0.0048	0.00742	0.01632	0.0591
$a_0$	2.2	3.59	2.27	0.42
$a_1$	0.75	0.8	0.59	-0.22
$a_2$	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
$a_3$	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112

Tabla 2b – Parámetros que son independientes de la longitud de onda para el algoritmo clorofila semi-analítico para regiones sin pigmentos empaquetados.

Parámetros independientes de la longitud de onda						
$X_0$	-0.00182		S	0.0225	$c_0$	0.2818
$X_1$	2.058		$p_0$	51.9	$c_1$	-2.783
$Y_0$	-1.13		$p_1$	1	$c_2$	1.863
$Y_1$	2.57				$c_3$	-2.387

### (c) El término retrodispersión

El coeficiente retrodispersión total,  $b_b(\lambda)$ , puede ser expresado como

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda). \quad (3)$$

donde los subíndices "w" y "p" se refieren al agua y a las partículas, respectivamente. El coeficiente  $b_{bw}(\lambda)$ , es constante y conocido. El coeficiente  $b_{bp}(\lambda)$ , es modelado como

$$b_{bp}(\lambda) = X \left[ \frac{551}{\lambda} \right]^Y. \quad (4)$$

La magnitud de la retrodispersión de la partícula es indicado por X, que es igual a  $b_{bp}(551)$ , mientras que Y describe la forma espectral de la retrodispersión de la partícula. Se determinó empíricamente los valores de X e Y por un modelo de inversión usando una fórmula similar a la Ecuación (4). Los valores de X e Y fueron comparado con los valores de  $R_{rs}(\lambda)$  medidos en cada estación con el propósito de hallar relaciones empíricas tanto para X como para Y como una función de  $R_{rs}(\lambda)$  en uno o más de las longitudes de onda del MODIS. En cuanto esto fue hecho, X e Y pueden ser estimadas de los datos MODIS. Estas relaciones empíricas son descritas debajo.

### (d) La expresión para X

La expresión general para X es

$$X = X_0 + X_1 R_{rs}(551). \quad (5)$$

donde  $X_0 = -0.00182$  y  $X_1 = 2.058$  ( $n = 53$ ,  $r^2 = 0.96$ ) son constantes obtenidas empíricamente. Si X sale negativo de la Ecuación (5), este deberá fijarse como cero.

### (e) Expresión para Y

Y fue hallado variar de una forma algo general con la razón  $R_{rs}(443) / R_{rs}(488)$ . Las variaciones en los valores del numerador y el denominador de esta razón son determinadas principalmente por la absorción del fitoplancton y CDOM. La absorción atribuible al agua es el mismo y bajo en ambas longitudes de onda. Así, en tanto la absorción del fitoplancton y CDOM covarien, la razón espectral de los

coeficientes de absorción  $a(443) / a(488)$ , será solo débilmente dependiente de la concentración del pigmento, y la razón espectral de los coeficientes de retrodispersión deberán tener un efecto significativo sobre la razón espectral de la  $R_{rs}$ . Por lo tanto  $Y$  se representa como

$$Y = Y_0 + Y_1 \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(448)} \quad (6)$$

Una función lineal de  $R_{rs}(443) / R_{rs}(448)$  donde  $Y_0$  y  $Y_1$  son constantes obtenidas empíricamente. Donde  $Y_0 = -1.13$  y  $Y_1 = 2.57$  ( $n = 22$ ,  $r^2 = 0.59$ ). Cuando  $Y$  es negativo de la Ecuación (6) esto es establecido a cero.

#### (f) Terminó Absorción

El coeficiente de absorción total puede ser expandido como

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_\phi(\lambda) + a_d(\lambda) + a_g(\lambda) \quad (7)$$

Donde los subíndices "w", " $\phi$ ", "d", y "g" se refieren al agua, fitoplancton, detritus, y CDOM ("g" significa gelbstoff). Aquí  $a_w(\lambda)$  son conocidas y las expresiones para  $a_\phi(\lambda)$ ,  $a_d(\lambda)$ , y  $a_g(\lambda)$  necesitan ser desarrollados.

#### (g) Expresión para $a_\phi$

La forma del espectro de  $a_\phi(\lambda)$  para una masa de agua en particular cambiará debido al efecto de empaquetamiento del pigmento (i.e., el aplanamiento de los picos de absorción es debido al autosombreado con el incremento de las concentraciones del pigmento intracelular y el gran tamaño de celdas) y los cambios en la composición del pigmento. Para un dominio en particular, las curvas de  $a_\phi(\lambda)$  son medidas normalizadas a  $a_\phi(675)$  reduce el rango dinámico y resulta en una variación suave para  $a_\phi(\lambda) / a_\phi(675)$  versus  $a_\phi(675)$  en las bandas MODIS centradas en datos con  $\lambda = 412, 443, 488, \text{ y } 551$  nm para dos regímenes subtropical de luz intensa. Como la clorofila-a es proporcional a  $a_\phi(675)$  se muestra cómo la absorción específica de la clorofila cambia con la concentración de la clorofila. Una función tangente hiperbólica fue escogida para modelar esta relación con el fin de asegurar que el valor de  $a_\phi(\lambda) / a_\phi(675)$  se aproxime a una asíntota en los valores muy altos o valores muy bajos de  $a_\phi(675)$ . Usando escalas logarítmicas para ambos ejes resulta en la siguiente ecuación del modelo para  $a_\phi(\lambda)$  como una función de  $a_\phi(675)$

$$a_\phi(\lambda) = a_0(\lambda) \exp \left[ a_1(\lambda) \tanh \left( a_2(\lambda) \ln \left\{ \frac{a_\phi(675)}{a_3(\lambda)} \right\} \right) \right] * a_\phi(675) \quad (8)$$

Donde los parámetros  $a_0(\lambda)$  hasta  $a_3(\lambda)$  son determinados empíricamente para cada longitud de onda de interés del MODIS. El parámetro  $a_0(\lambda)$  es el más importante de todos ellos por cuanto es directamente proporcional a  $a_\phi(\lambda)$ . Por simplicidad, solo  $a_0(\lambda)$  y  $a_1(\lambda)$  son variados para parametrizar  $a_\phi(\lambda)$ , con  $a_2(\lambda)$  y  $a_3(\lambda)$  puestos como valores constantes de  $-0.5$  y  $0.0112$ , respectivamente.

#### (h) Expresiones para $a_d$ y $a_g$

Los coeficientes  $a_d(\lambda)$  y  $a_g(\lambda)$  pueden ser ajustados de la forma  $a_x(\lambda) = a_x(400) \exp[-S_x(\lambda-400)]$  donde los subíndices “x” se refiere a uno y otro “d” o “g”. Debido a esta similitud en la forma espectral, esos términos no pueden ser espectralmente separados con los canales MODIS, así el término  $a_d(\lambda)$  es combinado operacionalmente con  $a_g(\lambda)$ , y ambas absorciones detrítal y CDOM son representados por  $a_g(\lambda)$ . El término de absorción detrítus y CDOM combinados es así escrito por

$$a_g(\lambda) = a_g(400) \exp^{-S(\lambda-400)} \quad (9)$$

donde S es determinado empíricamente. Muchos investigadores han reportado que  $S_d = 0.011$ , en promedio. Para los cruceros GOMEX y COLOR, un valor promedio de  $0.017 \text{ nm}^{-1}$  fue medido para  $S_g$ . Como una nota final sobre el modelo  $R_{rs}$ , las ecuaciones 5 – 9 son escritos en una forma general para enfatizar que los valores de los parámetros  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $Y_0$ ,  $Y_1$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  no son absolutos. Ellos deben ser actualizados y cambiados cuando mas datos son disponibles. Estos parámetros pueden también ser cambiados con la región y la estación para optimizar el rendimiento del algoritmo.

### (i) Invertiendo el Modelo

Todas las piezas del modelo de reflectancia están ahora en su lugar. Vía ecuaciones 2-4 y 5-9,  $R_{rs}(\lambda)$  puede ser expresado solamente como una función del término “constante”,  $R_{rs}(443)$ ,  $R_{rs}(448)$ ,  $R_{rs}(551)$ ,  $a_\phi(675)$ , y  $a_g(675)$  dado los valores para los parámetros para  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $Y_0$ ,  $Y_1$ ,  $a_0(\lambda)$ ,  $a_1(\lambda)$ , y S.  $L_{wn}(\lambda)$  del MODIS puede ser convertido en  $R_{rs}(\lambda)$  como fue mencionado anteriormente. Entonces, para cada píxel, la ecuación del modelo  $R_{rs}$  puede ser escrita para cada uno de las 5 bandas MODIS disponibles produciendo cinco ecuaciones escrito en tres desconocidos: el término "constante",  $a_\phi(675)$ , y  $a_g(400)$ . Usando las razones espectrales de  $R_{rs}(\lambda)$  elimina el término “constante”, ya que es independiente de la longitud de onda. En principio, dos ecuaciones de razón espectral pueden ser usadas para solucionar las dos incógnitas restantes  $a_\phi(675)$ , y  $a_g(400)$ . Basados en la forma de la curva de absorción para el fitoplancton versus detrítus y CDOM, las ecuaciones que usan razones espectrales de 412:443 y 443:551 para  $R_{rs}(\lambda)$  deberá proporcionar una buena separación de las dos contribuciones de absorción. Nuestras dos ecuaciones son:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(443)} &= \frac{b_b(412)}{b_b(443)} \frac{a(443)}{a(412)} \\ \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(551)} &= \frac{b_b(443)}{b_b(551)} \frac{a(551)}{a(443)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

El miembro derecho de cada ecuación es una función de  $a_\phi(675)$ ,  $a_g(400)$ ,  $R_{rs}(443)$ ,  $R_{rs}(488)$  y  $R_{rs}(551)$ . Ya que los valores de  $R_{rs}$  son proporcionados como entrada, ahora tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas. Las ecuaciones pueden ser usualmente solucionadas algebraicamente para proporcionar los valores de  $a_\phi(675)$ , y  $a_g(400)$ . Para resolver estas ecuaciones se usa un método computacional. Para aguas con altas concentraciones de CDOM y clorofila, los valores de  $L_w(412)$  y  $L_w(443)$  son pequeños, y el algoritmo semi-analítico no puede

funcionar apropiadamente (Gordon, et al. 1975; Gordon et al. 1983; Gordon et al. 1988; Gordon et al. 1994; Gordon et al. 1996; Jerome et al. 1988; O'Reilly et al. 1998).

El algoritmo bio-óptico OC3M para MODIS es escrito como sigue

$$R_L = \log_{10} \left( \max \left[ \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(551)}, \frac{R_{rs}(488)}{R_{rs}(551)} \right] \right) \quad (11)$$

$$\log_{10}(C_a) = 0.283 - 2.753 \cdot R_L + 0.659 \cdot R_L^2 + 0.649 \cdot R_L^3 - 1.403 \cdot R_L^4 \quad (12)$$

El algoritmo empírico para MODIS OC3M que se encuentra operativo es como sigue:

$$C_a = 10.0^{(0.2830 - 2.753 R_{3M} + 1.457 R_{3M}^2 + 0.659 R_{3M}^3 - 1.403 R_{3M}^4)} \quad (13)$$

donde

$$R_{3M} = \log_{10} (R_{550}^{443} > R_{550}^{490}) \quad (14)$$

El algoritmo depende del máximo empírico de la razón de tres bandas MODIS. (Carder et al. 1997; Martin, 2002)

## Referencias

- Robinson**, I.S., 1983: Satellite observations of ocean colour, Philo. Trans. Royal Soc. of London, Series A, Volume 309, 338-347. [http://www.physics.miami.edu/~chris/envr\\_optics.html](http://www.physics.miami.edu/~chris/envr_optics.html).
- Carder**, K.L., F. R. Chen, Z. Lee, S. K. Hawes, y J. P. Cannizzaro, Case 2 Chlorophyll *a*. MODIS Ocean Science Team. Algorithm Theoretical Basis Document ATBD 19 2003.
- Carder**, K.L., F.R. Chen, Z.P. Lee, y S.K. Hawes, Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures, *J. Geophys. Res.*, 104, c3, 5403-5421, 1999.
- Gordon**, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans, and W.W. Broenkow, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates, *Appl. Opt.*, 22, 20-36, 1983.
- Gordon**, H.R., and A. Morel, Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review, Springer-Verlag, New York, 1983.
- Gordon**, H.R., O.B. Brown, R.H. Evans, J.W. Brown, R.C. Smith, K.S. Baker, and D.K. Clark, A semi-analytic model of ocean color, *J. Geophys. Res.*, 93, 10,909-10,924, 1988.
- Gordon**, H.R., and M. Wang, Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the ocean with SeaWiFS: A preliminary algorithm, *Appl. Opt.*, 33, 443-452, 1994.
- Gordon**, H.R., O.B. Brown, and M.M. Jacobs, Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean, *Appl. Opt.*, 14, 417-427, 1975.
- Gordon**, H.R., "MODIS Normalized Water-leaving Radiance Algorithm Theoretical Basis Document," August 15, 1996. See WWW page:<http://eosps0.gsfc.nasa.gov/atbd/modis/atbdmod17new.html>
- Jerome**, J.H., R.P. Bukata, and J.E. Burton, Utilizing the components of vector irradiance to estimate the scalar irradiance in natural waters, *Appl. Opt.*, 27, 4012-4018, 1988.
- O'Reilly**, J.E., S. Maritorena, B.G. Mitchell, D.A. Siegel, K.L. Carder, S.A. Garver, M. Kahru, and C. McClain, Ocean color algorithms for SeaWiFS, *J. Geophys. Res.*, 103, 24,937-24,953, 1998.
- Carder**, K.L., S.K. Hawes, Z. Lee, and F.R. Chen (1997). MODIS: Case 2 chlorophyll *a* algorithm. ATBD-19,
- Martin**, S. 2002. An Introduction Ocean Remote Sensing. Cambridge University Press.