

Estimación de la concentración de clorofila-a en la superficie de la bahía de Sechura usando datos imágenes de Landsat 8

 Gilberto Ramírez^{*1,2,3}, Joel Rojas^{1,3} y Jhon Guerrero¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

² Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

³ Centro de Investigaciones Tecnológicas, Biomédicas y Medioambientales (CITBM)

Recibido 07 Feb 2021 – Aceptado 31 Mar 2021 – Publicado 03 Jul 2021

Resumen

El propósito de este estudio es implementar los algoritmos OC2 y OC3 para estimar la Concentración de Clorofila-a (CCA) superficial a partir de datos imágenes del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8. Se validó el modelo de corrección atmosférica LaSRC (Landsat 8 Surface Reflectance Code) con mediciones in situ de la reflectancia de la superficie del agua registrada con un espectroradiómetro en la superficie del área del cultivo de concha de abanico de la bahía de Sechura. La validación da como resultado un coeficiente de correlación lineal de $R = 95.1\%$ y un error cuadrático medio $RMSE = 0.0095$. También se hizo una comparación de la CCA derivadas de los algoritmos OC2 y OC3, obteniéndose como resultado un $RMSE=0.145\text{ mg/m}^3$ y un coeficiente de correlación de $R=99\%$. Por último, se hizo un contraste de los histogramas de la distribución espacial de la CCA estimadas de los algoritmos OC2 y OC3 sobre una región del área de estudio. Los resultados indican una mayor capacidad de discernir del algoritmo OC3 con respecto al algoritmo OC2.

Palabras clave: Clorofila-a, Landsat-8, OC2, OC3, Bahía de Sechura.

Estimation of the chlorophyll-a concentration on the surface of Sechura Bay using Landsat 8 image data

Abstract

The purpose of this study is to implement the OC2 and OC3 algorithms to estimate the concentration of surface chlorophyll-a (CCA) from image data from the OLI sensor aboard the Landsat-8 satellite. The LaSRC (Landsat 8 Surface Reflectance Code) atmospheric correction model was validated with on-site measurements of the reflectance of the water surface recorded with a spectroradiometer on the surface of the fan shell crop area of the Sechura Bay. Validation results in a linear correlation coefficient of $R = 95.1\%$ and a mean square error $RMSE = 0.0095$. A comparison of the CCA derived from the OC2 and OC3 algorithms was also made, resulting in an $RMSE = 0.145\text{ mg/m}^3$ and a correlation coefficient of $R = 99\%$. Finally, a contrast was made of the histograms of the spatial distribution of the CCA estimated from the OC2 and OC3 algorithms over a region of the study area. The results indicate a greater ability to discern the OC3 algorithm compared to the OC2 algorithm.

Keywords: Chlorophyll-a, Landsat-8, OC2, OC3, Sechura Bay.

Introducción

La calidad de las aguas costeras se basa en la absorción y scattering (esparcimiento) de la radiación solar por los constituyentes ópticos del agua (fitoplancton, partícu-

las inorgánicas, CDOM, etc.), ya que estas modifican las propiedades ópticas del cuerpo de agua. De estos constituyentes, el más importante es el fitoplancton ya que es el que posee la clorofila, pigmento que le permite recolectar la luz solar. La clorofila, gracias al proceso de

* gilberto.ramirez@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



fotosíntesis, produce material orgánico rico en energía y libera oxígeno.

El fitoplancton es el productor primario más importante de los ecosistemas marinos y constituye la base de la cadena alimenticia y un componente importante del ciclo global del carbono [1].

En cuanto a las características espectrales, los pigmentos presentes en las células del fitoplancton absorben intensamente la radiación en la región azul (440 nm) y en menor intensidad en la parte roja del espectro (675 nm). Esta información es utilizada en la teledetección del color del océano para estimar la concentración de la clorofila superficial.

Las imágenes de satélite pueden contribuir al monitoreo de calidad de aguas costeras, mediante la estimación de diferentes parámetros geofísicos del océano como la CCA, la temperatura superficial del mar, coeficiente de atenuación difusa, concentración de calcita, carbono orgánico particulado y otros. En este trabajo se propone un modelo físico (bio-óptico) de estimación de la Concentración de Clorofila-a (CCA) superficial usando datos imágenes del sensor OLI/Landsat 8 (30 m de resolución espacial) en la bahía de Sechura.

En este contexto, el presente trabajo aportará información sobre el uso de imágenes satelitales de mediana resolución espacial obtenidas del Landsat 8 (L8), como una herramienta de rutina para la evaluación de los cambios en la CCA y su distribución espacial, que será útil en el monitoreo de proliferaciones algales (blooms) que causan la muerte de moluscos como conchas de abanico y peces del ecosistema marino de la bahía.



Figura 1: Área de estudio: bahía de Sechura y localización de medidas in situ de espectroradiómetro (FieldSpec4). Composición de color RGB = 652 Imagen Landsat 8/LDCM (Landsat Data Continuity Mission) de fecha 16/12/2017.

Área de estudio

La bahía de Sechura se encuentra situada en la provincia del mismo nombre, delimitado entre 5°12' - 5°50' S y 80°50' - 81°12' W al noroeste del Perú. Posee una longitud aproximada de 23 km de oeste a este y de unos 89 km de norte a sur (Figura 1). En la bahía de Sechura, los sedimentos son depositados principalmente por el río Piura.

Las actividades consideradas de gran importancia son el cultivo de concha de abanico y la pesca artesanal [2]. Los puntos de color azul en la Figura 1 representa la localización de medidas in situ registradas con un espectroradiómetro el 08 de junio de 2019.

Fundamento teórico

La Reflectancia de Teledetección (R_{rs}) o “color del océano” es definido por:

$$R_{rs} \equiv \frac{L_w}{E_d}, \quad (1)$$

donde L_w es la radiancia que sale del agua y E_d es la irradiancia descendente en el aire, justo por encima de la superficie del agua (Figura 2). R_{rs} es la medida de la fracción de la irradiancia descendente que incide sobre la superficie del agua y que es devuelta a través de la superficie en un pequeño ángulo sólido $\Delta\Omega$ centrado sobre una dirección particular θ . R_{rs} es estimado usando la corrección atmosférica (código atmocor2.c documentado en OCSSW v2019) de [3].

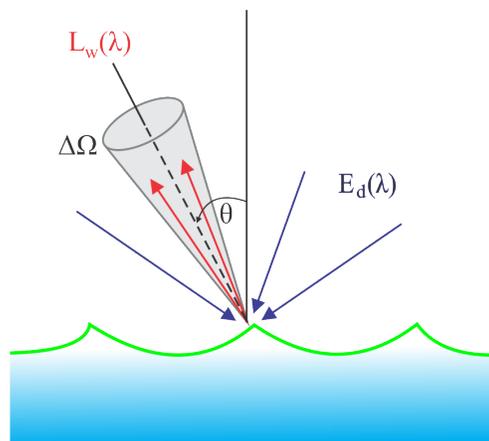


Figura 2: Esquema geométrico de la trayectoria de la radiación solar que contribuye a la reflectancia R_{rs} .

Por otro lado, la reflectancia de la superficie terrestre (ρ_{sr}) es estimada de imágenes Landsat 8 y se define como:

$$\rho_{sr} \equiv \frac{L_w + L_g + L_{wc}}{E_d}, \quad (2)$$

donde L_g y L_{wc} son debido a la radiancia solar directa y la radiancia por capas blancas y/o la espuma justo por encima de la superficie del mar [4].

La CCA en la superficie del mar, es estimada mediante el algoritmo empírico OCx de O'Reilly. El OCx es una relación polinómica de cuarto orden definido por:

$$\log_{10}(CCA) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\log_{10} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_{azul})}{R_{rs}(\lambda_{verde})} \right) \right)^i, \quad (3)$$

donde el numerador, $R_{rs}(\lambda_{azul})$, es el máximo de los valores de entrada R_{rs} y los coeficientes, a_0, \dots, a_4 , para el sensor OLI/L8 son derivados usando la base de datos NOMAD versión 2 (NASA bio-Optical Marine Algorithm Data Set).

La aplicación de la ecuación (3) a los datos imágenes del sensor OLI/L8 genera dos algoritmos de estimación de la CCA (OC2 y OC3). Los coeficientes de los algoritmos son mostrados en la Tabla 1.

	Azul (nm)	Verde (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
OC2	482	561	0.198	-1.812	1.974	-2.564	-0.722
OC3	443>482	561	0.241	-2.055	1.178	-0.554	-0.457

Tabla 1: Los valores de los coeficientes (adimensionales) de los algoritmos para el sensor OLI.

Datos

Datos imágenes Landsat 8

Se utilizaron imágenes producto de reflectancia superficial nivel 2 del sensor OLI/L8 (path 11, row 64), cuyo acceso es libre en el portal Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Las imágenes están corregidas atmosféricamente usando el modelo de corrección atmosférica LaSRC (Landsat 8 Surface Reflectance Code) desarrollado inicialmente por [5]. Las imágenes del sensor OLI (7 bandas espectrales) utilizadas en el presente trabajo corresponden a las fechas de 12 de mayo y 13 de junio de 2019, respectivamente.

Datos in situ

La precisión en la estimación de la CCA con imágenes de satélite depende de la confiabilidad de los datos de reflectancia superficial. En vista de ello, se realizó una campaña de medidas de reflectancia in situ en el área de estudio (Figura 1) usando un espectroradiómetro de modelo "FieldSpec 4Standard-Res". La campaña de medición se llevó a cabo el 08 de junio de 2019 en colaboración entre el IMARPE (Instituto del MAR de Perú) y LABTELER (LABoratorio de TELedetección y Energía Renovables de la UNSCH). Una de las medidas in situ se realizó en la zona de cultivo de la concha de

abanico. Se registró la medida en torno a las 11:00 a.m. en condiciones de poca nubosidad.

Metodología

Validación del modelo LaSRC

Con los datos in situ, se validó los datos producto de reflectancia superficial Landsat 8 (fecha 13 de junio de 2019) mediante la evaluación del coeficiente de correlación de Pearson y el error cuadrático medio (RMSE). El coeficiente de correlación de Pearson mide el grado de relación lineal que tienen dos conjuntos de datos y el RMSE mide la cantidad de error que hay entre ellos.

Estimación de la CCA

Se estimó la CCA (algoritmos OC2 y OC3) en la bahía de Sechura usando la reflectancia de teledetección, parámetro que está relacionado con ρ_{sr} mediante la Ec. (2). Se eligió la escena Landsat 8 adquirida el 12 de mayo de 2019. El algoritmo de estimación se implementó usando procesador multilevel l2gen instalado en el software SeaDAS v.7.5.3.

Se debe tener en cuenta que los algoritmos para imágenes OLI/L8 son fiables para valores de clorofila superior a 0.2 mg/m^3 [6].

Resultados y discusión

La Figura 3 muestra la reflectancia espectral del área de cultivo de la concha de abanico en la bahía de Sechura generados a partir de mediciones in situ y por satélite (Tabla 2). Se observa que tienen el mismo comportamiento tanto el algoritmo LaSRC (color azul) y la medición in situ con el espectroradiómetro (color rojo).

Bandas	Longitud de onda central	LaSRC	Espectroradiómetro
B1	0.4430 μm	0.0278	0.034790
B2	0.4826 μm	0.0287	0.033280
B3	0.5613 μm	0.0253	0.045567
B4	0.6546 μm	0.0135	0.011516
B5	0.8646 μm	0.0093	0.002197
B6	1.6090 μm	0.0089	0.002080
B7	2.2010 μm	0.0070	0.000269

Tabla 2: Valores de reflectancia superficial del área de cultivo de coordenadas ($80^\circ 58' 59''$ W y $5^\circ 48' 21''$ S) para las 7 bandas espectrales del sensor OLI (13/06/2019) estimadas mediante el algoritmo LaSRC y la medición in situ con el espectroradiómetro (08/06/2019).

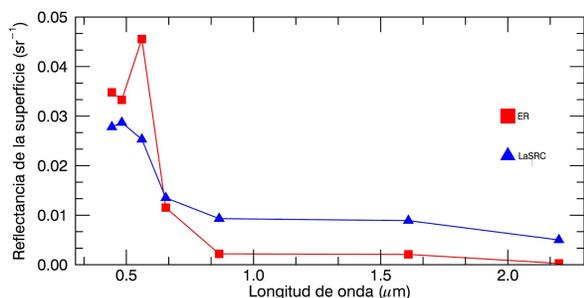


Figura 3: Comportamiento espectral del área de cultivo de la concha de abanico por los dos métodos: LaSRC (color azul) y la medición in situ con el espectro radiómetro (ER) (color rojo).

La reflectancia de la superficie del área de cultivo disminuye progresivamente desde el espectro visible al NIR. La banda B1 (azul, $\lambda_c=0.4430 \mu\text{m}$) hasta la banda B7 (SWIR-2, $\lambda_c=2.2010 \mu\text{m}$) debido a los constituyentes ópticos del océano (agua del mar, fitoplancton, material orgánico disuelto coloreado, partículas orgánicas y burbujas). La diferencia entre la reflectancia satelital y las mediciones in situ en el rango de 0.443 y $0.482 \mu\text{m}$, es posiblemente por la baja relación señal/ruido y/o la dificultad de obtener la R_{rs} real en esta región del espectro que está fuertemente condicionada a la determinación de los aerosoles en la corrección atmosférica [7].

La Figura 4, muestra la gráfica de dispersión de las reflectancias satelital e in situ de la Figura 3. Si comparamos el algoritmo LaSRC con la medición in situ se observa que en el orden de decimas cuentan con el mismo valor las bandas 1, 2, 3 y 4 y a partir de las bandas 5, 6 y 7 cuentan con el mismo valor hasta el orden de las centésimas. Aunque la banda 7 difiere mucho de in situ.

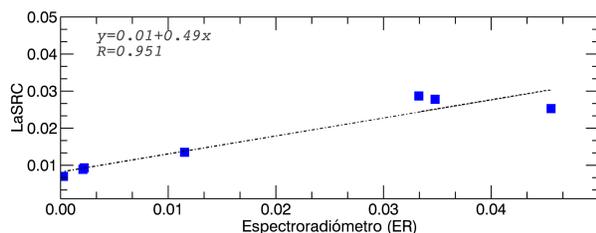


Figura 4: Dispersión entre reflectancia satelital estimado por el algoritmo LaSRC vs la reflectancia in situ medido por el espectroradiómetro.

Se realiza el ajuste lineal y se calcula el coeficiente de correlación de Pearson (R) y el error cuadrático medio (RMSE). Los valores que se obtienen son $R = 95.1\%$ y $\text{RMSE} = 0.0095$. Estos valores indican que los datos de reflectancia superficial satelital son confiables y que pueden ser utilizados en modelos de estimación de variables geofísicas.

En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de la CCA obtenido tras aplicar la ecuación (3) a las imágenes

de reflectancia superficial Landsat 8 del 12 de mayo de 2019.

Las áreas de mayor CCA se extienden en las orillas de la bahía, probablemente esto es debido a los aportes de nutrientes que llegan por los tributarios de la bahía como el río Piura.

Un factor importante que afecta la precisión de la estimación de la CCA, es la existencia de sedimentos suspendidos o contaminantes debido a la presencia de plantas de harina y aceite de pescado (Copeinca y Perupez) que producen una alta reflectancia superficial causando una sobreestimación de la CCA.

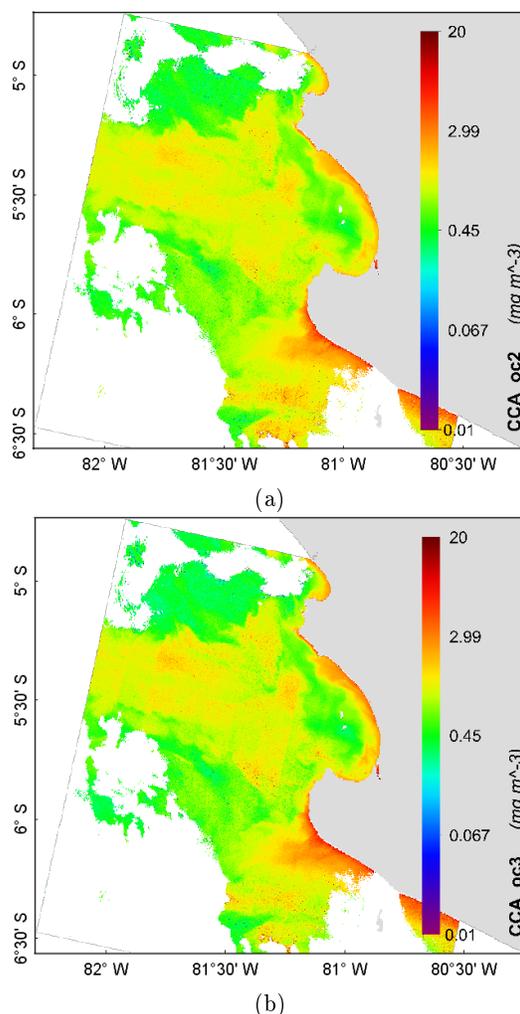


Figura 5: Distribución espacial de la CCA (mg/m^3) es estimado de datos del sensor OLI mediante los algoritmos a) OC2 y b) OC3 sobre la bahía de Sechura y áreas vecinas para el 12 de mayo de 2019. La distribución espacial de la CCA fue procesado usando el software SeaDAS v.7.5.3. Las áreas blancas son áreas sin datos.

Los dos algoritmos (OC2 y OC3) se comportan de

manera similar para el agua de la bahía, aunque algunas variaciones podrían no ser visibles debido a la forma en que se muestra el mapa de la clorofila-a (Figura 5).

Se calcula la estadística de la CCA derivadas de los algoritmos OC2 y OC3 sobre la bahía de Sechura de la escena L8 del 12 de mayo de 2019. La CCA derivada del algoritmo OC3 registra el valor máximo de 6.91 mg/m³ al norte (próximo a la desembocadura del río Piura) y un mínimo de 0.07 mg/m³ en proximidades del centro de la bahía, el promedio de 1.0775 mg/m³ con desviación estándar de 0.5986 de un total de 1302284 píxeles válidos. Mientras que OC2 para la misma área de evaluación (1302246 píxeles validos) produce casi similares resultados.

En la Figura 6 se compara los histogramas de la CCA derivadas de los algoritmos OC2 y OC3, cuyos datos son obtenidos de la región de interés sombreada en rojo ubicada en la bahía de Sechura. El histograma es mostrado en escala logarítmica debido a la distribución log-normal de la CCA [8].

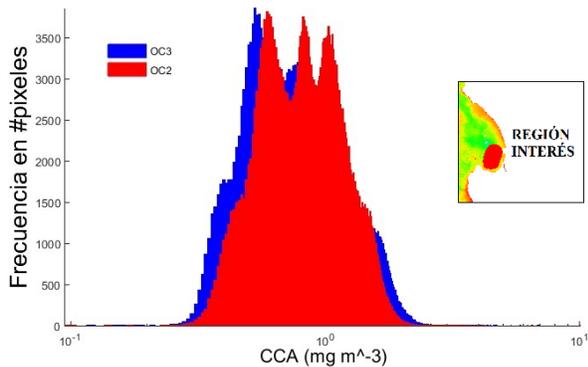


Figura 6: Comparación de los histogramas de la distribución espacial de la CCA sobre el área de estudio (polígono sombreado de color rojo ubicado en el panel superior derecho) estimadas mediante los algoritmos OC2 (color rojo) y OC3 (color azul). Fecha 12 de mayo de 2019.

Asimismo del histograma se observa que para valores de CCA menores a 1.0 mg/m³ el modelo OC2 sobreestima lo estimado por el modelo OC3 en cambio para valores de CCA mayores a 1.0 mg/m³ el modelo OC2 subestima lo estimado por el modelo OC3. Los resultados indican que el algoritmo OC3 para L8 tiene la mayor capacidad de discernir la concentración de la clorofila que OC2 por emplear las tres bandas sensibles al cambio del color de océano, uno en la región espectral del verde ($\lambda=561$ nm) y dos en la región espectral del azul (443 y 482

nm). Esto se muestra en el histograma de la Figura 6, que indica una buena sensibilidad del algoritmo OC3 en zonas de baja concentración de la CCA (valores menores a 1.0 mg/m³).

En la Figura 7 se presenta la regresión lineal de la CCA estimada con los algoritmos OC2 y OC3 en una escena L8 del 12 de mayo de 2019. Se realizó la regresión en el área de cultivo de concha de abanico de la bahía de Sechura que obtuvo como resultado un RMSE de 0.145 mg/m³, bias de 0.1762 y un coeficiente de correlación de R=99.3%.

El conjunto de datos de CCA utilizados para el gráfico de dispersión (Figura 7) varían entre 0.07 y 5.12 mg/m³. Como se observa en la Figura 7, los datos usados para la comparación se aproximan bastante a la recta 1:1 diagonal.

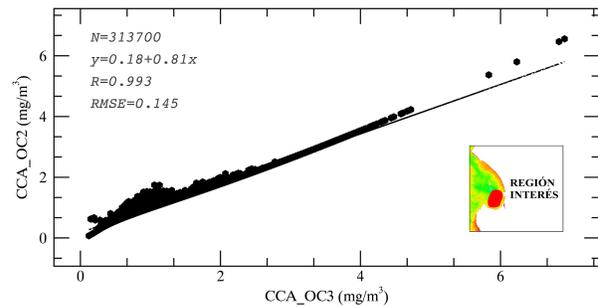


Figura 7: Gráfico de dispersión entre la CCA estimada de datos imágenes del sensor OLI de fecha 12 de mayo de 2019 sobre la superficie del área de cultivo de concha de abanico mediante los algoritmos OC2 y OC3.

Conclusiones

La validación de los datos de reflectancia superficial satelital muestra que este conjunto de datos es confiable para la estimación de CCA. Los algoritmos de estimación de la CCA (OC2 y OC3) difieren muy poco en los valores estimados. Sin embargo, el algoritmo OC3 identifica más niveles de CCA en comparación con OC2 en regiones de baja CCA.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y LABTELER por los datos in situ de reflectancia de la superficie del mar medidos con el espectraloradiómetro (FieldSpec 4 Standard-Res) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Referencias

- [1] C. Mobley, D. Stramski, W. Bisset and E. Boss. Optical modeling of ocean waters: Is the case-1 case-2 still useful. *Oceanography*, Vol. 17 No. 2, pp 60-67 (2004).
- [2] J. Mendo, M. Wolff, T. Mendo and L. Ysla. Chapter 28 - Scallop Fishery and Culture in Peru. En S. E. Shumway & G. J. Parsons (Eds.), *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*. Elsevier, Vol. 40, pp. 1089-1109 (2016).
- [3] B. Franz, S. Bailey, N. Kuring and P. Werdell. Ocean color measurements with the Operational Land Imager on Landsat-8: implementation and evaluation in SeaDAS. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 9 No. 1, pp. 096070-096070 (2015).
- [4] J. O'Reilly. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Vol. 11, pp. 9-23 (2000).
- [5] E. Vermote, C. Justice, M. Claverie and B. Franch. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008> (2016).
- [6] C. Hu, Z. Lee and B. Franz. Chlorophyll algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (2012).
- [7] J. Delegido, C. Tenjo, A. Ruiz-Verdú, R. Peña y J. Moreno. Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HI-CO. *Revista de Teledetección*, Vol. 41, pp. 37-47. [doi:10.4995/raet.2014.2295](https://doi.org/10.4995/raet.2014.2295) (2014).
- [8] H. Gordon y A. Morel. *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review*. New York: (Springer-Verlag), (1983).