

CALIBRAZIONI REGIONALI DELL'ALGORITMO OC3M MODIS (AQUA) PER LA STIMA DELLA CLOROFILLA

Carolina SANTINI (*), Fabio MASELLI (*), Maurizio PIERI (**)
Alberto ORTOLANI (**), Roberto COSTANTINI (***)

- (*) IBIMET-CNR, Via Giovanni Caproni, 8, 50145 Firenze, Italy, maselli@ibimet.cnr.it
(**) LaMMA, Regione Toscana, Via Madonna del Piano, 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italy
(***) LaMMA-CRES, Regione Toscana, Via Cavour, 16, 58100 Grosseto, Italy

Riassunto

I dati di livello 2 del sensore MODIS installato a bordo del satellite Aqua contengono stime di concentrazione di clorofilla-*a* ricavate dall'applicazione di un algoritmo standard (OC3M). Le stime da satellite sono state confrontate con i valori di concentrazione di clorofilla ottenuti da campagne di campionamento ARPA in quattro regioni (Emilia-Romagna, Veneto, Puglia e Toscana). Obiettivo del presente lavoro è quello di ricalibrare localmente l'algoritmo standard per offrire, grazie ad una semplice procedura, stime di clorofilla da dati MODIS Aqua, rappresentative delle condizioni reali presenti nel Mar Mediterraneo. Ad eccezione dell'area di mare interessata dagli effetti della foce del fiume Po e caratterizzata da una sovrastima pari a quattro volte i valori di clorofilla osservati, per le aree della Toscana e della Puglia la sovrastima è pari al doppio circa delle misure considerate.

Abstract

The level 2 data of MODIS sensor installed on board of the Aqua satellite contain estimates of chlorophyll-*a* concentration obtained through the application of a standard algorithm (OC3M). The satellite estimates were currently compared to the values of chlorophyll concentration obtained by ARPA sampling campaigns in four regions (Emilia-Romagna and Veneto, Puglia and Toscana). The goal of the present work was to locally tune the standard algorithm in order to provide chlorophyll values from MODIS Aqua data, representative of the actual conditions of the Mediterranean Sea. With exception of the sea portion affected by the effects of the mouth of the Po River and characterized by an overestimation equal to four times the chlorophyll values observed, the overestimation is approximately equal to two times the considered measurements for the areas of Toscana and Puglia.

Introduzione

L'interesse per il monitoraggio della qualità delle acque costiere e di largo dell'Italia sta diventando sempre più vivo, considerando anche la preoccupazione che hanno provocato i recenti casi di intossicazione verificatisi durante l'estate 2005, in Liguria, dovuti ad un fenomeno di proliferazione dell'alga tossica *Ostreopsis ovata*. Inoltre, il fenomeno delle mucillaggini in Adriatico, i numerosi episodi di inquinamento provocati dagli sversamenti, accidentali e non, di petrolio in mare, ed ancora, il degrado degli habitat marini dedotti dalla regressione delle praterie di posidonie evidenziano la grande vulnerabilità e delicatezza dell'ecosistema marino. Sono numerose e gravi le conseguenze di una mancata attenzione per l'ecosistema marino, anche sulla salute dell'uomo che, da agente principale di inquinamento delle acque, si trasforma nell'ultimo anello della catena di vittime causata da lui medesimo. Diventa quindi fondamentale un monitoraggio giornaliero ed

esteso delle caratteristiche ecologiche delle acque marine sia per garantire l'idoneità alla balneazione che per una gestione eco-sostenibile delle risorse ittiche.

Gli ecosistemi acquatici sono caratterizzati dalla concentrazione di clorofilla-*a*, un pigmento presente nel fitoplancton, che rappresenta il primo anello della catena trofica e quindi strettamente connesso alla produttività primaria delle acque.

Da alcuni anni, IBIMET-CNR e LaMMA-Regione Toscana si occupano attivamente sia di valutare il contributo dei prodotti standard offerti dai sensori satellitari dedicati al mare (MODIS e MERIS), sia di realizzare algoritmi di stima dei costituenti marini, empirici o semi-empirici, calibrati sulle acque, principalmente della regione Toscana.

La scelta di utilizzare dati di livello 2 del sensore MODIS Aqua è giustificata dal fatto che tali dati sono disponibili sul sito della NASA dal 2002 fino ad oggi, e che il satellite oceanico Aqua dovrebbe rimanere operativo ancora per diversi anni.

Per ricalibrare l'algoritmo di stima della clorofilla-*a*, erano a disposizione misure ottenute da campionamenti ARPA per tre macroaree comprendenti le acque antistanti le regioni Toscana, Puglia, Emilia-Romagna e Veneto, per un intervallo di tempo che dal 2001 arriva al 2004.

Quindi, i dati del satellite Aqua che includono l'intervallo di tempo durante il quale sono state effettuate le campagne a mare, offrono l'opportunità di utilizzare le immagini per monitorare le acque marine al presente.

In questo studio, le calibrazioni locali per le tre macroaree marine sono state realizzate per il prodotto oceanico sviluppato e distribuito dalla NASA per il satellite Aqua che utilizza una versione di nuova generazione di algoritmi di stima della concentrazione di clorofilla-*a* (OC3M).

Questa nuova generazione di algoritmi, più sofisticati dei precedenti, è stata realizzata tramite studi empirici e si basa su algoritmi in forma di polinomiale dove la variabile indipendente è costituita dal massimo valore raggiunto fra alcuni selezionati rapporti tra bande.

L'algoritmo utilizzato per il MODIS installato sul satellite Aqua è così espresso:

$$Chl_a = 10^{(0.2830 - 2.753R + 1.457R^2 + 0.659R^3 - 1.403R^4)}$$

dove:

$$R = \log_{10} (R_{550}^{443} > R_{550}^{490})$$

ed R_{550}^{443} , ad esempio, è il rapporto tra le riflettanze alle lunghezze d'onda indicate in apice e pedice di R . In questo tipo di algoritmo il classico rapporto tra le riflettanze in banda blu e verde, utilizzato per la stima della concentrazione di clorofilla-*a*, è sostituito dal valore più alto tra i rapporti fra le bande indicate per la discriminazione della clorofilla (O'Reilly et al., 1998; O'Reilly et al., 2000).

E' stato osservato che nelle acque più torbide, il valore massimo dei rapporti tra le bande migra dal blu al verde.

Aree di studio

Le aree di studio comprendono le porzioni di mare antistanti le coste di quattro regioni italiane in cui la pesca marittima assume una notevole importanza dal punto di vista economico. In particolare si tratta delle seguenti regioni: Toscana, Puglia, Veneto ed Emilia-Romagna, queste ultime due raccolte in un'unica macroarea (Fig. 1). La Toscana è lambita dalle acque sia del Mar Ligure sia del Mar Tirreno. Le coste si estendono per circa 400 Km (da Marina di Carrara, a Nord, alla foce del torrente Chiarone, a Sud). I litorali sono per lo più bassi e sabbiosi ad eccezione delle coste alte e rocciose comprese fra Livorno e Castiglioncello, il promontorio di Piombino, Punta Ala, Talamone e l'Argentario. I fiumi principali sono l'Arno e l'Ombro che con i loro pennacchi ricchi di sedimenti caratterizzano le acque costiere fino al largo.

La Puglia è caratterizzata da coste basse e sabbiose ed è bagnata a Nord-Est dal Mar Adriatico ed a Sud dal Mar Ionio. Gli scarsi fiumi sono concentrati nella parte settentrionale. Il fiume più importante è l'Ofanto.

La terza macroarea è caratterizzata dalla presenza del pennacchio del fiume Po, che raggiunge una notevole estensione con elevate quantità di sedimenti in sospensione. Bagnata dal Mar Adriatico, la regione Veneto è caratterizzata oltre che dalla presenza del delta del Po anche dalla laguna di Venezia. Il fiume Adige sfocia presso Chioggia mentre il Piave sbocca a Nord-Est di Venezia, presso il porto di Cortellazzo. La presenza del delta del Po e delle foci di altri importanti fiumi (Adige, Piave, Brenta) comporta un afflusso notevole di sostanze ricche di fosfati e nitrati favorito dagli scarichi agricoli, industriali ed urbani nei fiumi. L'abbondanza di fertilizzanti e sostanze organiche favorisce il fenomeno dell'eutrofizzazione del mare.

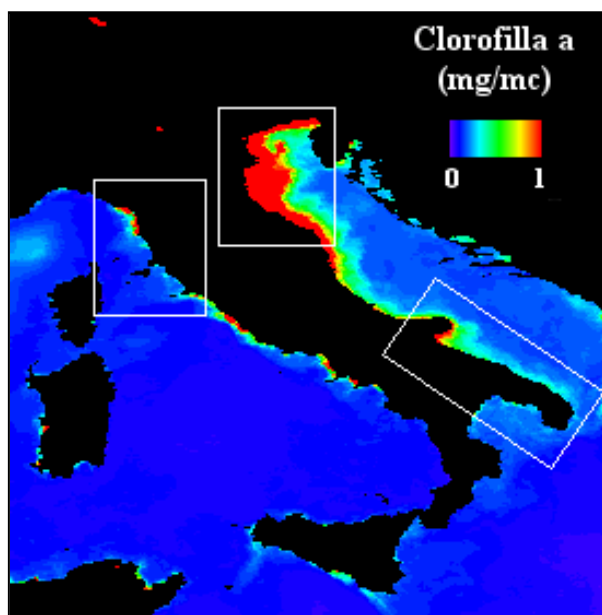


Figura 1 - Mappa della concentrazione media mensile di clorofilla-a ottenuta dall'algoritmo standard OC3M (MODIS Aqua, a 4 Km di risoluzione) per agosto 2002, con evidenziate le aree in studio

Misure ARPA di clorofilla-a

Fin dall'inizio degli anni '80 l'interesse ambientale per la risorsa mare ha incoraggiato le pubbliche amministrazioni verso il monitoraggio regolare e standardizzato delle caratteristiche bio-chimiche delle acque marine al fine di proteggere l'ambiente acquatico dall'inquinamento organico ed inorganico dovuto alle attività antropiche.

Le ARPA regionali controllano in modo sistematico durante tutto l'anno numerosi parametri chimico-fisici e biologici di campioni di acqua che sono prelevati lungo transetti perpendicolari alla linea di costa. I punti di prelievo che sono stati considerati in questo lavoro si trovano ad una distanza di 1000 e 3000 m circa dalla costa. I dati disponibili per le 4 regioni partono da giugno 2001 ed arrivano a luglio 2004.

In questo studio, la misura del parametro marino utilizzato e connesso con il comportamento ottico delle acque è stata la concentrazione di clorofilla-a misurata a 50 cm dalla superficie del mare. La concentrazione di clorofilla-a come pigmento presente nel fitoplancton è direttamente correlata alla popolazione fitoplanctonica, ed è stimabile da satellite.

Dati MODIS

Sulla base delle date dei prelievi dei campioni d'acqua nelle aree investigate, sono state selezionate, per ogni zona, circa una dozzina di immagini del sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montato sul satellite Aqua alla risoluzione di 1 km. Dal browser del sito oceancolor.gsfc.nasa.gov sono state selezionate le immagini MODIS Aqua di livello 2 che, in formato hdf, contengono le stime di concentrazione di clorofilla. Anche altri parametri possono essere scaricati gratuitamente tramite i file hdf, cioè, le *water leaving radiance* normalizzate delle 7 bande, il coefficiente di attenuazione diffusa, K490, un prodotto riguardante l'aerosol e la temperatura superficiale del mare. I dati Aqua, vagliati grazie al browser del sito *Oceancolor*, sono disponibili da luglio 2002 fino ad oggi.

Le mappe di clorofilla si presentano non corrette geometricamente. La correzione geometrica è stata effettuata tramite il software ENVI a partire dai *layer* dei file hdf contenenti informazioni sulle coordinate geografiche, tramite la procedura di costruzione di una GLT (*Geographic Lookup Table*) in cui per ogni *pixel* sono disponibili i dati geografici necessari per ottenere le coordinate finali. Tale metodo di correzione geometrica è risultato molto veloce e più preciso rispetto a quello dei GCP (*Geographic Control Point*). Per un controllo visuale dei prodotti georiferiti è stato sovrapposto un *layer* vettoriale comprendente le linee di costa delle aree in esame. L'estrazione dei valori di clorofilla dalle mappe è stata effettuata tramite il software di elaborazione immagini, ENVI.

Analisi e discussione dei risultati

I valori estratti dalle immagini MODIS in corrispondenza dei prelievi dei campioni d'acqua, sono stati correlati con le misure in mare di clorofilla. Nell'analisi di regressione dei dati, sono stati considerati 73 campioni per la Toscana, 63 per la Puglia, 88 per l'area che comprende Veneto ed Emilia Romagna. I diagrammi di dispersione sono riportati in Figura 2, 3 e 4.

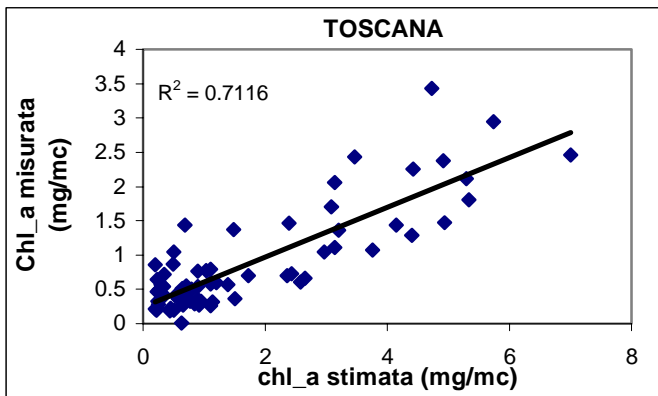


Figura 2 - Diagramma di dispersione dei valori di concentrazione di clorofilla-a stimati da satellite e misurati in mare con indicato il coefficiente di determinazione, nel mare antistante la Toscana

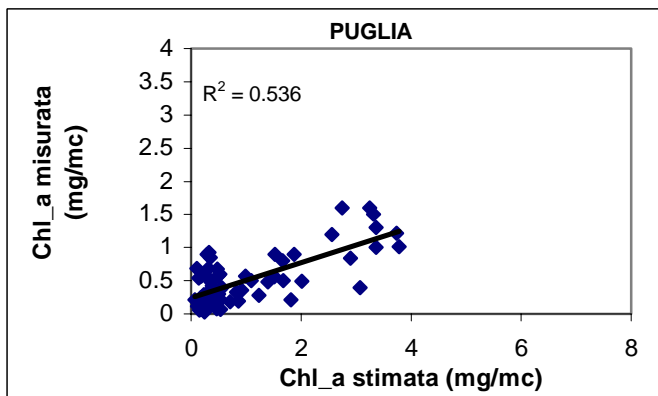


Figura 3 - Diagramma di dispersione dei valori di concentrazione di clorofilla-a stimati da satellite e misurati in mare con indicato il coefficiente di determinazione, nel mare antistante la Puglia

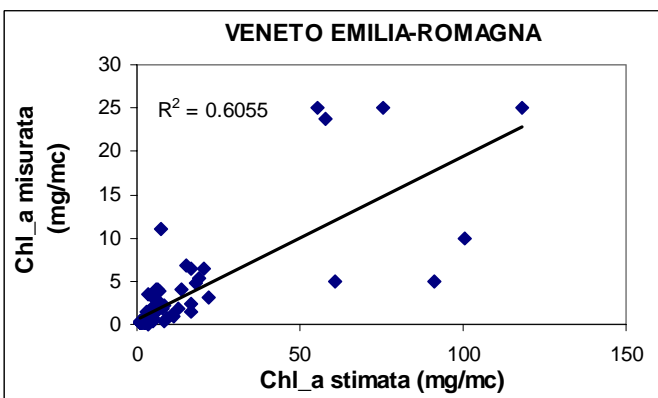


Figura 4 - Diagramma di dispersione dei valori di concentrazione di clorofilla-a stimati da satellite e misurati in mare con indicato il coefficiente di determinazione, nel mare antistante il Veneto e l'Emilia-Romagna

Per quanto riguarda le aree della Toscana e della Puglia, si può notare una sovrastima delle misure del satellite pari a due volte il valore della clorofilla misurata. Mentre per l'area che comprende il pennacchio del Po i valori di clorofilla stimati quadruplicano quelli misurati su un *range* medio-alto di valori di clorofilla misurata (fino a 26 mg/mc). Questi risultati per quanto riguarda l'area del Tirreno sono conformi a quelli ottenuti da studi su prodotti MODIS (Terra) e MERIS (Envisat) di precedenti ricerche (Santini et al. 2004, Santini et al. 2005).

Per quanto riguarda il Tirreno e l'area dell'Adriatico e Ionio vicino alla Puglia, il carattere oligotrofico delle acque suggerisce una sovrastima da satellite, probabilmente causata dall'applicazione dell' algoritmo globale che, nel tentativo di adeguarsi localmente ad acque con contenuto di clorofilla medio-basso, sovrasta le basse concentrazioni.

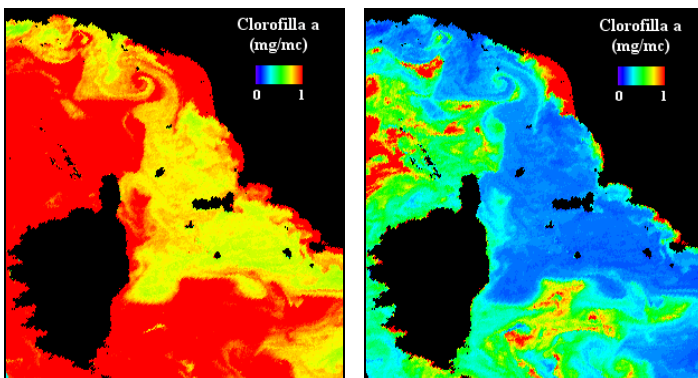


Figura 5 - Immagine MODIS (Aqua) per la porzione di mare antistante la Toscana, del 5 Marzo 2003: a sinistra mappa di concentrazione di clorofilla-a ottenuta dall'algoritmo standard OC3M ed a destra la mappa ricalibrata per l'area in esame

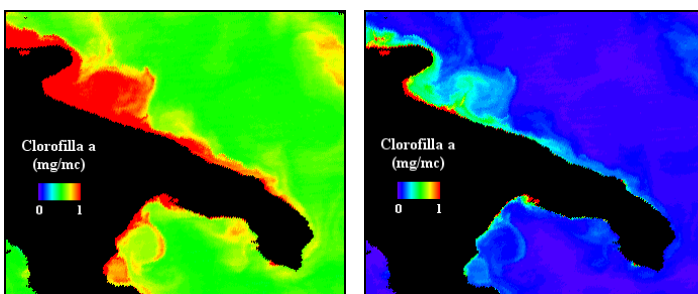


Figura 6 - Immagine MODIS (Aqua) per la porzione di mare antistante la Puglia, del 6 Luglio 2004: a sinistra mappa di concentrazione di clorofilla-a ottenuta dall'algoritmo standard OC3M ed a destra la mappa ricalibrata per l'area in esame

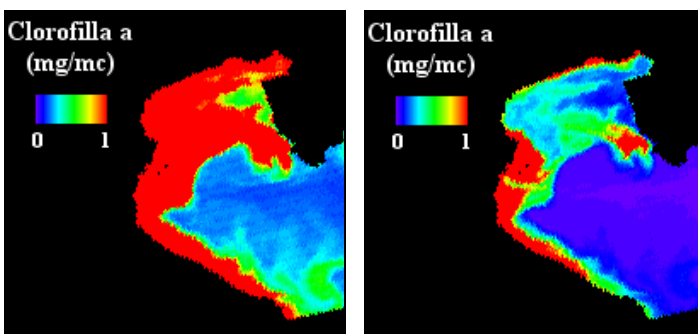


Figura 7 - Immagine MODIS (Aqua) per la porzione di mare antistante Veneto ed Emilia Romagna, del 5 Luglio 2004: a sinistra mappa di concentrazione di clorofilla-a ottenuta dall'algoritmo standard OC3M ed a destra la mappa ricalibrata per l'area in esame

Il fatto che per l'area dell'Adriatico a Nord-Ovest, con valori di clorofilla medio-alti, si riscontri una sovrastima addirittura quadruplicata rispetto a quella delle altre due aree, fa supporre che il problema sia connesso non tanto all'algoritmo di stima di clorofilla ma all'effetto della considerevole presenza di sedimenti in sospensione che comporta un aumento di riflettanza nelle bande del verde, cioè in quelle dedicate allo studio della clorofilla (Ahn et al., 2001). Inoltre il tipo di correzione atmosferica applicato che si basa sulla procedura ideata da Gordon e Voss (1999) che utilizza il metodo del *dark pixel* fa pensare ad una concomitante sovracorrezione delle bande del blu (Siegel et al., 2000; Darecki, Stramski, 2004, Santini et al. 2004).

L'effetto della calibrazione applicata alle stime ottenute dal MODIS può essere visivamente apprezzato dal confronto visivo delle mappe ottenute dall'algoritmo OC3M standard con quelle ottenute applicando una costante di calibrazione locale per ogni area in esame (Fig. 5, 6 e 7).

Tale costante rappresenta il rapporto tra la media dei dati stimati e quella dei dati misurati per ogni area in esame: 0.51 per la Toscana, 0.50 per la Puglia, 0.24 per Veneto ed Emilia-Romagna.

Conclusioni

Il carattere oligotrofico della porzione Nord-Ovest del Mediterraneo, che comprende parte del Mar Tirreno e parte del Mar Ligure, è confermato anche in questo studio. L'area del basso Adriatico, che lambisce le coste della Puglia è partecipe della stessa caratteristica per la scarsa presenza di clorofilla e quindi di sostanze trofiche.

La situazione è molto diversa per quanto riguarda l'Adriatico settentrionale che risulta in condizioni eutrofiche, con un *range* di clorofilla medio-alto, anche per gli effetti degli apporti dei fiumi che sfociano in mare.

Grazie alla disponibilità di dati a mare forniti dalle ARPA regionali e di immagini satellitari accessibili gratuitamente dal sito della NASA, è stato possibile per quattro regioni italiane stabilire delle costanti di calibrazione e validazione di dati MODIS. Si presenta quindi concreta l'opportunità di fornire su siti internet dedicati, mappe di concentrazione di clorofilla, che potrebbero essere consultate sia da utenti esperti sia da utenti non specializzati al fine di valutare le condizioni biologiche delle acque marine.

Una semplice e veloce procedura può rendere i dati utilizzabili per una prima valutazione giornaliera della concentrazione della clorofilla e quindi indirettamente di altri parametri correlati quali la produttività primaria e la pescosità delle acque marine esaminate.

Bibliografia

Ahn Y.H., Moon J.E., Gallegos S. (2001), "Development of Suspended Particulate Matter Algorithms for Ocean Color Remote Sensing", *Korean J. of Rem. Sens.*, Vol.17, No.4, 285-295.

Darecki M., Stramski D. (2004), "An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea", *Remote Sensing of Environment*, 89, 326-350.

Gordon H.R., Voss K.J. (1999), "MODIS Normalized Water-leaving Radiance", *ATBD (MOD 18)*, ver. 4, 100.

O'Reilly J., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Kahru M., Garver S.A., McClain C.R. (1998), "Ocean color algorithms for SeaWiFS", *Journal of Geophysical Research* 103, 24937-24953.

O'Reilly J., Maritorena S., O'Brien M., Siegel D., Toole D., Menzies D., Smith R., Mueller J., Mitchell B., Kahru M., Chavez F., Strutton P., Cota G., Hooker S., McClain C., Carder K., Müller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G., Aiken J., Arrigo K., Letelier R., Culver M. (2000), "SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses", Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., *NASA Goddard Space Flight Center*, 49 pp.

Santini C., Pieri M., Santoro E., Massi L., Maselli F. (2004), "Analisi di dati MERIS e MODIS nello studio delle acque marino costiere della Regione Toscana", *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA, GEOMATICA Standardizzazione, interoperabilità e nuove tecnologie*, 14-17 Dicembre 2004, Roma.

Santini C., Santoro E., Pieri M., Massi L. E Maselli F. (2005), "Le immagini del satellite Envisat (MERIS) per lo studio delle acque marino costiere della Regione Toscana", *Rivista Italiana di Telerilevamento*, no 32, pp 35-46.

Siegel D.A., Wang M., Maritorena S., Robinson W. (2000), "Atmospheric Correction of Satellite Ocean Color Imagery: The Black Pixel Assumption", *Applied Optics*, 39, 3582-3591.