

Utilizzo di osservazioni satellitari e misure *in situ* per lo studio dei potenziali impatti della deposizione atmosferica nel lago di Garda

Ilaria Cazzaniga (*,**), Claudia Giardino (*), Mariano Bresciani (*), Erica Matta (*),
Marco Gianinetto (**), Walter Di Nicolantonio (***), Anna Rampini (*),
Alessandra Cacciari (***), Giovanna Ober (****)

(*) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR-IREA,
via Bassini 15, 20133 Milano, Italia, tel. 0223699296, fax 0223699300, e-mail: giardino.c@irea.cnr.it

(**) Politecnico di Milano, piazza Leonardo Da Vinci 32, 20133 Milano, Italia, e-mail: marco.gianinetto@polimi.it

(***) Compagnia Generale per lo Spazio, CGS S.p.A., via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italia,
e-mail: w.dinicolantonio@isac.cnr.it

(****) Compagnia Generale per lo Spazio, CGS S.p.A., via Gallarate 150, 20151 Milano, Italia,
e-mail: gober@cgspace.it

Riassunto

In questo studio abbiamo analizzato l'effetto della deposizione della polvere (*dust*) sahariana sulla crescita fitoplanctonica (i.e. l'ipotesi della fertilizzazione da *dust*) nel lago di Garda, un bacino oligotrofico con basse concentrazioni di nutrienti e di clorofilla (*chl-a*), unendo dati satellitari a misure *in situ*. Sono stati individuati due eventi di *dust* sahariano in corrispondenza del 28/07/2005 e del 9-10/10/2007 attraverso: (i) l'elaborazione dei dati SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*), (ii) un aumento relativamente significativo di concentrazione di PM10 rispetto a quella di PM2.5 in corrispondenza di stazioni di misura *in situ* a sud e nord del Lago; e (iii) alti valori di spessore ottico atmosferico (AOT, *Aerosol Optical Thickness*) in concomitanza a bassi valori del coefficiente di Angstrom misurato dalla stazione delle rete AERONET di Ispra. A distanza di alcuni giorni dagli eventi, sono state registrate da immagini MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) un aumento delle concentrazioni di *chl-a* nel lago. Le immagini MERIS sono state processate attraverso l'algoritmo *Case-2 Regional* (C2R) della rete neurale VISAT-BEAM che ha prodotto valori comparabili con quelli misurati *in situ* ($r=0.78$). I risultati preliminari sembrano indicare un effetto sul lago di Garda in termini di aumento di *chl-a* in conseguenza degli eventi di *dust* sahariano del 28/07/2005 e del 9-10/10/2007. È importante precisare che al fine di avere o meno una conferma del collegamento fra la deposizione atmosferica e le dinamiche del fitoplancton nell'area di studio, è obbligatoria l'analisi di ulteriori eventi che saranno effettuati all'interno del progetto SINOPIAE.

Abstract

In this study we investigated the effect of the deposition of Saharan dust on the phytoplankton growth (i.e. dust fertilization hypothesis) in Lake Garda, an oligotrophic basin with low nutrient and low chlorophyll-a (chl-a) concentration, by combining satellite data with in situ measurements. Two Saharan dust events were identified on 28/07/2005 and 9-10/10/2007 by: (i) SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) data processing, (ii) a significant increase of PM10 with respect to PM2.5 in a site southern and northern the lake; and (iii) the high values of AOT (Aerosol Optical Thickness) with corresponding low values of the Angstrom parameter measured by AERONET in Ispra. Few days later, an increase of chl-a in the lake was detected from MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer). The images were processed with the Case-2 Regional (C2R) processor of the VISAT-BEAM neural network that provided values comparable to in situ measurements ($r=0.78$). Preliminary results thence seems to indicate a response of the Lake Garda

in terms of increasing of chl-a as a consequence of the Saharan dust events recognized on 28/07/2005 and 9-10/10/2007. Nevertheless, the analysis of further events is mandatory in order to have confirmation (or no), about the linkage between atmospheric deposition and phytoplankton dynamics in the study area. The analysis of further events to be carried out within the project SINOPIAE.

Introduzione

Differenti lavori (es. Sabouri et al., 2001; Richardson et al., 2003) mostrano come ci sia una forte relazione fra la qualità dell'aria e dell'acqua:

1. contaminanti chimici e azotati sono due tipi di inquinanti che deteriorano sia acqua che aria;
2. gli inquinanti atmosferici possono precipitare al suolo attraverso le precipitazioni o, semplicemente, per gravità;
3. la produzione di aerosol dalle acque superficiali provoca il trasferimento di materiali acquatici (compresi nutrienti e batteri) in aria.

In questo studio ci siamo concentrati sul secondo punto, spesso chiamato "deposizione atmosferica" con particolare attenzione per le tempeste di sabbia. In particolare, il *dust* minerale (e.g. Fe) che ha origine nelle aree desertiche viene trasportato dai venti per lunghe distanze; la sua deposizione in acque povere di nutrienti può provocare fioriture fitoplanctoniche che facilitano la crescita di biomassa, alterando la qualità delle acque (Meskhidze et al., 2005; Carbo et al., 2005).

In Europa, il Sahara è la sorgente più importante di *dust* minerale che, di conseguenza, si diffonde attraverso il Mediterraneo verso l'Europa. Studi di un eventuale impatto di eventi di *dust* sahariano sulla crescita della biomassa fitoplanctonica sono stati condotti soprattutto nel mar Mediterraneo (es. Volpe et al., 2009; Guerzoni et al., 1999; Guerzoni et al., 1997).

Lo scopo di questo articolo è quello di presentare un'analisi preliminare sugli apporti da *dust* sahariano al lago di Garda, un lago oligotrofico situato nella regione subalpina dell'Italia settentrionale. Lo studio si basa su osservazioni satellitari, caratterizzati da una frequenza regolare e una larga copertura spaziale, adatte a osservare i parametri sia degli aerosol che del fitoplancton. Inoltre, vengono usate misure *in situ* dell'area di studio sia per validare le osservazioni da satellite che per meglio discutere i risultati. Il progetto di ricerca SINOPIAE, nel quale viene condotto questo studio, prevede infine l'installazione, presso la stazione sperimentale E. Zilioli a Sirmione del Garda, di un fotometro solare CIMEL, i cui dati entreranno all'interno della rete AERONET (Holben et al., 1998) grazie al quale le attività discusse in questo lavoro, potranno essere condotte in modalità sistematica.

Area di Studio

Lo studio è stato condotto sul lago di Garda, il più grande lago in Italia (superficie d'area: 370 km², volume: 50 km³ e profondità massima: 346 m), situato nella valle del Po. La regione, che corrisponde al bacino di raccolta del fiume Po, ha una popolazione di circa 16 milioni di persone, anche se il territorio è popolato in modo disomogeneo, e produce il 40% del PIL. Ospita il 37% dell'industria nazionale, fornendo il 46% dei posti di lavoro, circa il 55% del bestiame d'allevamento e il 35% della produzione agricola nazionale. Il lago di Garda è un bacino oligotrofico con basse concentrazioni di nutrienti e di clorofilla-a.

Materiali e Metodi

Per verificare il collegamento fra gli eventi di *dust* sahariano e la crescita di fitoplancton, i dati da remoto sono stati combinati con le misure *in situ* raccolte nella regione del lago (Figura 1).

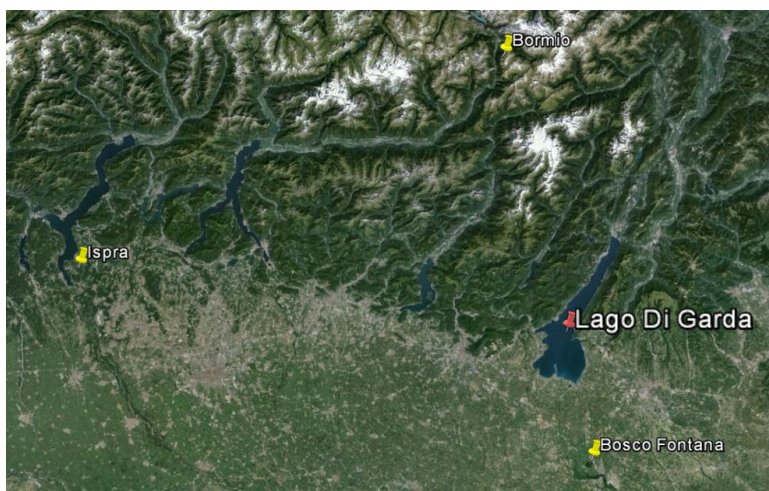


Figura 1. Area di studio con indicati in giallo le stazioni a terra utilizzate per i dati di PM (Bosco Fontana e Bormio) e i dati AERONET (Ispra).

Dati in situ

Sono stati scelti tre siti di misura limitrofi al lago di Garda per avere prova degli eventi di trasporto di *dust* nell'area di studio:

- Bosco Fontana, un sito di pianura rurale, circa 30 km a sud del lago di Garda e Bormio, un sito alpino, circa a 70 km a nord del lago di Garda, che forniscono i valori del materiale particolato (PM10 e PM2.5) nel bacino del fiume Po. Durante gli eventi di trasporto di *dust* ci si aspetta un aumento delle concentrazioni sia di PM10 che di PM2.5, con un aumento più marcato per la frazione più grossolana (PM10) rispetto a quella più fine (PM2.5).
- Ispra, a circa 150 km a ovest del lago di Garda, dove sono forniti dalla rete AERONET dati continui sia di AOT che del parametro Angstrom (α). La polvere sospesa nell'atmosfera comporta alti valori di AOT in concomitanza a bassi valori di α . In particolare, valori di α maggiori di 2,0 indicano che vi sono particelle fini. (e.g., particelle di fumo e solfati), mentre valori di α vicini a zero indicano la presenza di particolato più grossolano, come il *dust* sahariano (Eck et al., 1999).

Per verificare le stime derivate dalle immagini satellitari (per esempio delle concentrazioni di chl-a) e per migliorare la discussione circa le dinamiche del fitoplancton, sono stati utilizzati dati *in situ* del lago di Garda (es. temperatura superficiale) raccolti dall'APPA Trento, dal CRA di Sirmione e dalla stazione pelagica LTER nel lago di Garda.

Immagini satellitari

Le concentrazioni di chl-a per il lago di Garda sono state ottenute dal sensore MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) trasportato a bordo del satellite Envisat-1 e operativo dal 2002 al 2012. Lo strumento ha un angolo di vista in corrispondenza del nadir di circa 68,5°. Il MERIS ha una risoluzione spaziale di circa 300 m e copre una strisciata larga 1150 km. I dati di livello 1 di radianza a risoluzione completa al di sopra dell'atmosfera di MERIS sono stati processati con i *toolbox Basic Envisat/ERS ATSR* e di MERIS (BEAM) (Fomferra e Brockmann, 2013). A tutte le immagini MERIS, preventivamente georeferite, è stata applicata una *SMILE-correction* che permette di correggere la distorsione del valore registrato dal sensore dovuto allo spostamento di lunghezza d'onda a seconda della posizione del pixel (Fomferra e Brockmann, 2013). In seguito è stato applicato il *tool ICOL (Improved Contrast between Ocean and Land)* per correggere gli effetti di adiacenza che possono influenzare la determinazione della riflettanza dell'acqua nei pixel vicino

alla costa (Santer et al., 2007). Le immagini corrette radiometricamente e per gli effetti di adiacenza sono state convertite in prodotti di qualità dell'acqua utilizzando l'algoritmo del BEAM *Case-2 Regional* (C2R) che è già stato utilizzato con successo (Odermatt et al., 2010; Bresciani et al., 2011) per ricavare le concentrazioni di chl-a nel lago di Garda.

Oltre alle immagini MERIS sono state utilizzate le immagini del radiometro SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*), a bordo del satellite meteorologico MSG-1 (Meteosat-8) (Schmetz et al., 2002), per individuare gli eventi di *dust*. L'alta risoluzione temporale (15 minuti) e spaziale (circa 4x4 km² in corrispondenza dell'area di studio) delle immagini nei canali dell'infrarosso (IR) hanno permesso di seguire l'evoluzione del trasporto di polveri attraverso la regione italiana. Sulla base dei dati SEVIRI di livello 1.5 (Rogers, 2001), sono stati ottenuti i valori di radianza per ogni pixel a terra, applicando ad ogni canale un coefficiente di calibrazione lineare ed una costante di offset. Dunque la temperatura di brillantezza (BT) viene ricavata usando la relazione di Rosenfeld et al. (2005). Dai canali di IR del SEVIRI, sono state ricavate le due differenze di BT, (BT12.0-BT10.8) e (BT10.8-BT8.7), per accertare la presenza di *dust* desertico.

Risultati

L'intervallo temporale studiato va dal 2003 al 2011. L'analisi dei dati *in situ* di qualità dell'aria (non mostrati in questo studio) hanno mostrato che il 2005 e il 2007 sono stati gli anni con la più alta frequenza di eventi atmosferici, caratterizzati da concentrazioni elevate di PM e da episodi di *dust* sahariano. In particolare, due eventi di *dust* sahariano sono stati individuati nei giorni DOY (*Day Of the Year*) 209 del 2005 (28/07/2005) e nei giorni 282 e 283 del 2007 (9-10/10/2007). Dunque, i risultati della discussione sono limitati a questi due eventi e alle corrispondenti finestre temporali a cavallo degli eventi.

Sono state prodotte successioni di immagini RGB del SEVIRI usando le due differenze di BT, oltre alla BT nel canale IR a 10.8 μm ; in questa combinazione RGB il *dust* risulta nei toni del rosa-magenta mentre, le nuvole alte e dense, appaiono rosso-marroni e le nuvole sottili molto scure. La Figura 2 mostra il trasporto di *dust* desertico verso l'Italia nel DOY 209, un evento che ci si aspetta sia stato trasportato anche verso la regione del lago di Garda.

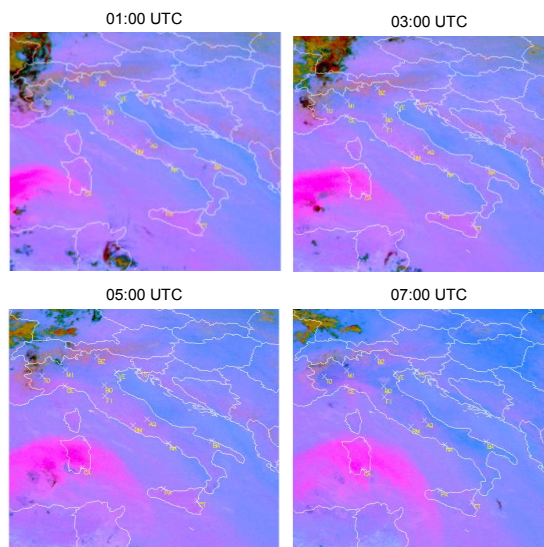


Figura 2. Evento di *dust* sahariano dal MSG-1/SEVIRI (RGB: IR12.0-IR10.8; IR10.8-IR8.7; IR10.8) registrato nel giorno 209 in un intervallo di sei ore.

I risultati ottenuti dall'analisi dei dati SEVIRI sono stati rinforzati dai dati *in situ* che hanno anch'essi individuato il trasporto di *dust* nell'area di studio. Un pronunciato aumento nella concentrazione della frazione grossolana PM10, in confronto a quella della più fine PM2.5, è stato registrato per il giorno DOY 209 nel sito di Bosco Fontana e per i giorni 9-10/10/2007 nel sito di Bormio.

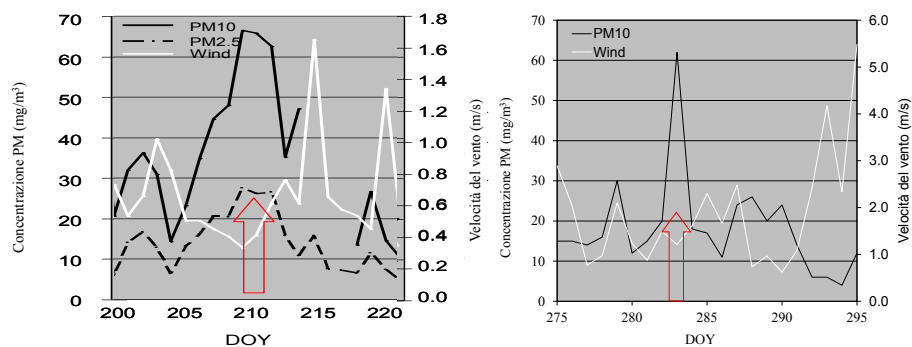


Figura 3. A sinistra: PM10, PM2.5 e velocità del vento a Bosco Fontana nella finestra temporale a cavallo dell'evento; la freccia indica il giorno dell'evento (i.e., DOY 209); a destra PM10 e vento misurati a Bormio nella finestra temporale a cavallo dell'evento; la freccia indica il giorno dell'evento (i.e., DOY 282, 283).

Nei due periodi in esame, nella stazione AERONET di Ispra (Figura 1) sono stati registrati, per il 28/07/2005, alti valori di AOT (1,77, a fronte di 0,37, media del mese di luglio) in corrispondenza di bassi valori di α (0,91, a fronte di 1,60, media del mese di luglio) ed anche per l'evento del 9-10/10/2007 sono stati registrati valori di AOT abbastanza alti (0,62, a fronte di 0,31 media mensile) e bassi valori di α (0,47, a fronte di 1,95 media mensile) (Figura 4).

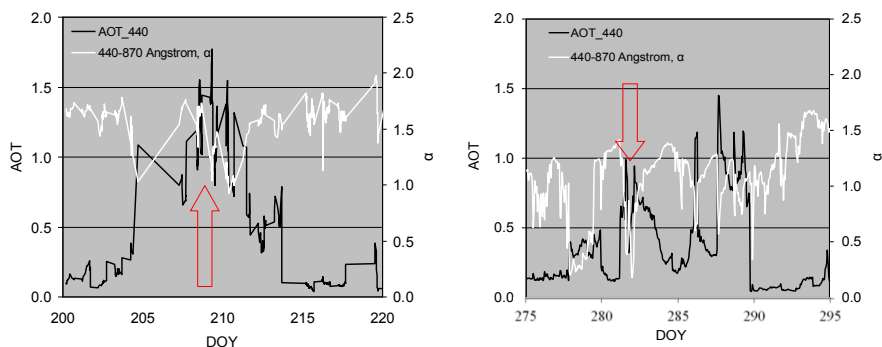


Figura 4. Valori di AOT a 440 nm e parametro Angstrom α ricavati dalla stazione AERONET di Ispra. A sinistra valori relativi alla finestra temporale a cavallo dell'evento di dust del 28/07/2005; a destra valori relativi alla finestra temporale a cavallo dell'evento di dust del 9-10/10/2007; la freccia indica il giorno dell'evento.

Il MERIS ha stimato che le concentrazioni di chl-a erano comparabili con le misure *in situ* ($r=0,79$; coefficiente angolare della retta di regressione: 1,03), confermando come in [14, 15] le capacità del C2R per le acque del lago di Garda. La Figura 5 mostra le mappe di chl-a prodotte da MERIS per l'area pelagica, selezionata perché la meno influenzata dalla zona costiera.

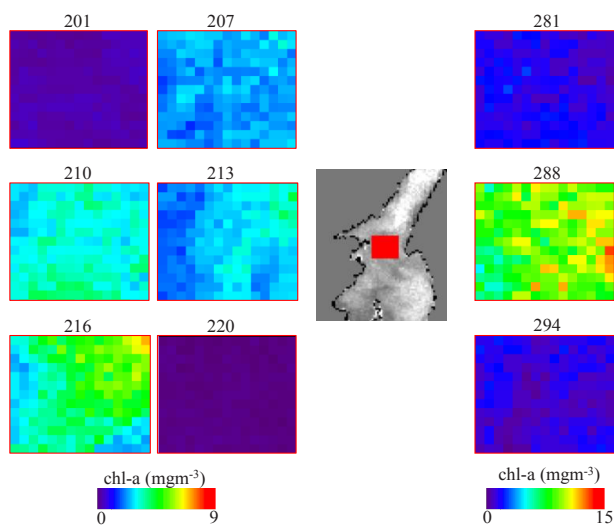


Figura 5. Mappe della concentrazione di chl-a prodotte tramite MERIS: a sinistra per l'intervallo temporale a cavallo dell'evento del 28/07/2005, a destra per l'intervallo temporale a cavallo dell'evento del 9-10/10/2007, per l'area pelagica mostrata nel riquadro rosso.

Per quanto riguarda il 2005, le mappe mostrano un trend di crescita per la concentrazione di chl-a, con un picco di circa 5 mgm^{-3} il DOY 216, che può essere dovuto alla deposizione del *dust* sahariano nel lago. In ogni caso, per stabilire un'eventuale relazione con l'evento avvenuto nel DOY 209, sono stati esaminati ulteriori elementi che condizionano la crescita del fitoplancton. Durante lo stesso periodo, la temperatura superficiale del lago (LST) ha mostrato un abbassamento di circa 2°C contemporaneamente all'aumento della concentrazione di chl-a stimata da MERIS (Fig. 6). Poiché nel lago di Garda vi è una correlazione positiva fra T e chl-a [16], si può assumere che la crescita del fitoplancton non ha dipeso dalla temperatura. Per il 2007 le mappe mostrano un trend di crescita fino a un picco di circa 8 mgm^{-3} il DOY 288: nello stesso periodo la temperatura ha subito un abbassamento di circa $1,5^\circ\text{C}$ e valgono quindi le stesse considerazioni fatte per il 2005.

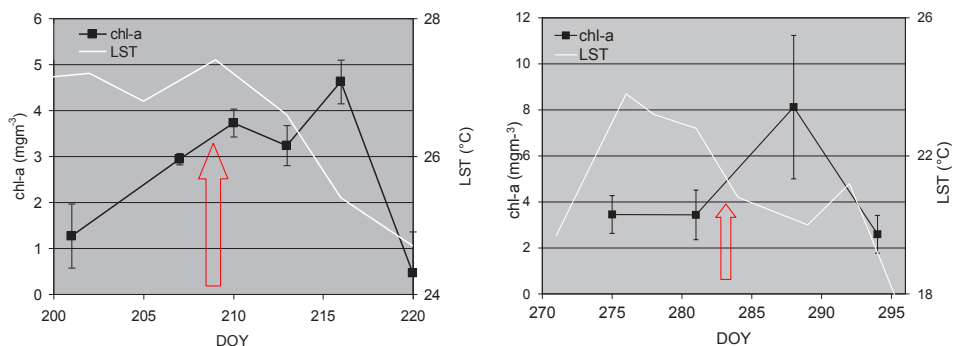


Figura 6. Andamento delle misure in situ della LST e della chl-a stimata da MERIS (viene mostrato il valore medio delle mappe mostrate in Fig. 5 con la deviazione standard) nella finestra temporale a cavallo dell'evento di *dust*, a sinistra per l'evento di luglio 2005, a destra per l'evento di ottobre 2007; la freccia indica il giorno dell'evento.

Conclusioni

Il legame fra deposizione del *dust* saharinai e crescita di fitoplancton nel sistema oligotrofico del lago di Garda è stato studiato integrando dati satellitari e misure *in situ*. In particolare due eventi di *dust* sahariano sono stati riconosciuti nei giorni 28/07/2005 e del 9-10/10/2007 attraverso:

- immagini MSG-1/SEVIRI;
- il sensibile aumento di PM10 in confronto al PM2.5 misurato a Bosco Fontana il 28/07/2005 e a Bormio il 9-10/10/2007;
- gli alti valori di AOT con i concomitanti bassi valori del parametro Angstrom misurati dalla stazione AERONET di Ispra.

Nonostante l'impatto della deposizione atmosferica sulla qualità dell'acqua del lago di Garda sia ancora in fase di studio, i risultati preliminari sembrano indicare una risposta del lago di Garda in termini di aumento di chl-a agli eventi di *dust* sahariano con un ritardo di 3-5 giorni.

Ulteriori eventi di trasporto sahariano sopra l'Italia già individuati (soprattutto fra il 2005 e il 2007) verranno indagati con i metodi presentati in questo studio. Il progetto di ricerca SINOPIAE, nel quale viene condotto questo studio, prevede infine l'installazione, presso la stazione sperimentale E. Zilioli a Sirmione del Garda, di un fotometro solare CIMEL, i cui dati entreranno all'interno della rete AERONET e grazie al quale le attività discusse in questo lavoro, potranno essere condotte in modalità sistematica.

Allo stesso tempo, i futuri sensori spaziali di nuova generazione (e.g., ESA-*Sentinel-3*, ASI-PRISMA) daranno l'opportunità di continuare la mappatura della chl-a nel lago di Garda attraverso immagini satellitari. Ci aspettiamo che le ulteriori analisi permetteranno di dare o meno conferma del legame fra deposizioni atmosferiche e dinamiche del fitoplancton nell'area di studio.

Ringraziamenti

I dati MERIS sono stati resi disponibili tramite il progetto ESA AO-553; i dati MSG-1/SEVIRI sono stati procurati da EUMETSAT. Grazie a Giuseppe Zibordi per i dati AERONET di Ispra, ad Alessandro Mondini (ARPA Lombardia) e Luca Ferrero (Università Milano-Bicocca) per i dati di qualità dell'aria e a Gianluca Fila e Chiara De Francesco per le misure *in situ* di chl-a. Questo lavoro è stato reso possibile grazie al co-finanziamento dai progetti SINOPIAE (Regione Lombardia) e CLAM-PHYM-*Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA Hyperspectral Mission* (ASI, contratto nr. I/015/11/0).

Riferimenti bibliografici

- Bresciani M, Giardino C, Boschetti L. (2011). "Multi-temporal assessment of bio-physical parameters in lakes Garda and Trasimeno from MODIS and MERIS". *Italian Journal of Remote Sensing*, 43(3), 49–62.
- Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, Morabito G, Giardino C. (2011). "Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the Water Framework Directive in European perialpine lakes". *Science of the Total Environment*, 409, 3083–3091.
- Carbo P, Krom MD, Homoky WB, Benning LG, Herut B. (2005). "Impact of atmospheric deposition on N and P geochemistry in the southeastern Levantine basin". *Deep-Sea Research II*, 52, 3041–3053.
- Eck TF, Holben BN, Reid JS, Dubovik O, Smirnov A, O'Neill NT, Slutsker I, Kinne S. (1999). "Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols". *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, 104(D24), 31333–31349.
- Fomferra N, Brockmann C. (2013). The BEAM project web page [Internet]. Carsten Brockmann Consult, Hamburg, Germany. Available from: <http://www.brockmann-consult.de/beam/>.
- Guerzoni S, Chester R, Dulac F, Herut B, Loye-Pilot MD, Measures C, Migon C, Molinaroli E, Moulin C, Rossini P, Saydam C, Soudine A, Ziveri, P. (1999). "The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea". *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 147–190.

- Guerzoni S, Molinaroli E, Chester R. (1997). "Saharan dust inputs to the western Mediterranean Sea: depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications". *Deep-Sea Research II*, 44, 631–654.
- Holben BN, Eck TF, Slutsker I, Tanre D, Buis JP, Setzer A, Vermote E, Reagan JA, Kaufman YJ, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I, Smirnov A. (1998). "AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization". *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1–16.
- Meskhidze N, Chameides WL, Nenes A. (2005). "Dust and pollution: A recipe for enhanced ocean fertilization?". *Journal Geophysical Research*, 110(D3), D03301.
- Odermatt D, Giardino C, Heege T. (2010). "Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes". *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 607–617.
- Richardson et al., (2003). "Estimating Estuarine Pollutant Loading From Atmospheric Deposition Using Casco Bay, Maine as a Case Study"; May 2003, 25 p.
- Rogers C. (2001). MSG Level 1.5 Image Data Format Description, EUMETSAT Doc. No. EUM/MSG/ICD/105, issue 2.
- Rosenfeld D, Lensky I, Kerkmann J, Tjemkes S, Govaerts Y, Roesli HP. (2005). "Applications of Meteosat Second Generations (MSG) – Conversion from counts to radiances", version 1.2, MSG Interpretation Guide, EUMETSAT web-site: www.eumetsat.org.
- Sabouri R, Afkhami M, Zarasvandi A, Khodadadi M. (2011). "Correlation Analysis of Dust Concentration and Water Quality Indicators". *International Journal of Environmental Science and Development*, 2(2), 91–97.
- Santer R, Zagolski F, Gilson M. (2007). Uni. du Littoral, France, ICOL ATBD, Version, 0.1, Feb.
- Schmetz J, Piu P, Tjemkes S, Just D, Kerkmann J, Rota S, Ratier A. (2002). "An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG)". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(7).
- Volpe G, Banzon VF, Evans RH, Santoleri R, Mariano AJ, Sciarra R. (2009). "Satellite observations of the impact of dust in a low-nutrient, low-chlorophyll region: Fertilization or artifact?". *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB3007.