

## Valutazione degli effetti della correzione atmosferica sulla stima dei parametri di qualità delle acque

Ilaria CAZZANIGA<sup>(1,2)</sup>, Mariano BRESCIANI<sup>(1)</sup>, Cristiana BASSANI<sup>(3)</sup>, Giuseppe MORABITO<sup>(4)</sup>,  
Claudia GIARDINO<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, via Bassini 15, 20133 Milano, Italia, cazzaniga.i@irea.cnr.it, bresciani.m@irea.cnr.it, giardino.c@irea.cnr.it, <sup>(2)</sup>Università degli studi di Milano – Bicocca, Laboratorio di Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano <sup>(3)</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, Via Salaria km 29.300, 00015 Monterotondo RM, cristiana.bassani@iia.cnr.it <sup>(4)</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, Largo Tonolli 50 Verbania Pallanza 28922 VB, g.morabito@ise.cnr.it.

### Riassunto

L'uso di tecniche di telerilevamento per la stima dei parametri di qualità delle acque è sempre più diffuso: grazie alle sue caratteristiche è uno strumento che permette un monitoraggio ad alta frequenza, con una visione sinottica, a costi relativamente contenuti.

La grandezza fisica utilizzata per la stima dei parametri di qualità delle acque è in genere la *Remote Sensing Reflectance* ( $R_{rs}$ ,  $sr^{-1}$ ), ottenibile dalle immagini satellitari attraverso la loro correzione atmosferica. Scopo di questo lavoro è la comparazione e la validazione dei prodotti di diversi approcci maggiormente utilizzati per i sensori di nuova generazione per la correzione atmosferica delle immagini e la validazione dei prodotti finali di concentrazione di clorofilla-a ottenuti a partire dai prodotti di  $R_{rs}$  più performanti. L'area studio scelta è quella dei laghi subalpini e di Mantova, dove acque otticamente complesse con diversi livelli di trofia, unitamente all'effetto di adiacenza dovuto alle coste (molto più riflettenti rispetto all'acqua), rendono la correzione atmosferica un processo non banale. I risultati hanno mostrato come, al fine di ottenere prodotti accurati per la stima dello stato trofico delle acque, la correzione atmosferica è un passaggio fondamentale e che deve essere effettuata considerando le caratteristiche dell'ambiente considerato.

### Abstract

*Remote Sensing techniques for water quality parameters retrieval are more and more spread: due to their own characteristics, they are a useful instrument for high frequent monitoring, with a synoptical point of view and at a relative low cost. The physical quantity mainly used for the retrieval of water quality parameters is Remote Sensing Reflectance ( $R_{rs}$ ,  $sr^{-1}$ ), retrievable from Remote Sensing images through atmospheric correction. The goal of this work is the comparison and validation of atmospheric corrected products derived from different atmospheric correction approaches for last generation sensors and the validation of final chlorophyll-a concentration products retrieved from the best estimates of  $R_{rs}$ . The study area includes subalpine lakes and Mantua Lake, where optically complex waters with different trophic levels, together with the adjacency effect due to coast (much more reflective than water), make atmospheric correction a complex process. Results showed that atmospheric correction is a fundamental step, in order to obtain accurate products for water trophic level evaluation, which need to take into account the target area characteristics.*

### Introduzione

L'uso di tecniche di telerilevamento nel monitoraggio della qualità delle acque interne risulta molto vantaggioso, per la possibilità di effettuare un monitoraggio frequente, continuo, con una visione sinottica, a costi contenuti, essendo un valido strumento d'integrazione delle misure *in situ* (es. Bresciani et al., 2011; Tyler et al., 2016). La stima della concentrazione di clorofilla-a (**chl-a**),

*proxy* dell'abbondanza di fitoplancton, di solidi sospesi e di sostanze organiche disciolte, nonché la presenza di organismi potenzialmente tossici (es. cianobatteri) a partire dai valori di *Remote Sensing Reflectance (Rrs)*, richiede una accurata stima di quest'ultima grandezza. La Rrs si ottiene dai valori di radianza registrati dai sensori attraverso una catena di processamento che include la rimozione degli effetti dovuti alla presenza dell'atmosfera, ovvero gas e aerosol. Molte sono le tecniche utilizzate, basate sia su modelli empirici che su modelli di trasferimento radiativo, *image-based* o supportati da misure dei parametri climatologici e atmosferici. Ciò che differenzia maggiormente i diversi approcci è il modo in cui viene stimato il contributo aerosolico al segnale, diverso per concentrazione e tipologia di aerosol: diversamente dai gas, infatti concentrazione e composizione degli aerosol sono fortemente variabili nello spazio e nel tempo. Scopo di questo lavoro, inserito all'interno del progetto di ricerca BLASCO (*Blending and Satellite Laboratory techniques for detecting cyanobacteria*), è la valutazione delle performance di differenti codici di trasferimento radiativo e dei risultati di stima di chl-a ottenute dai sensori di nuova generazione Landsat-8 (L8) e Sentinel-2 (S2).

### Area di studio

In questo lavoro, l'analisi si è concentrata sui grandi laghi subalpini meso-oligotrofici Maggiore e Garda ed il lagofluviale di Mantova. Per questi laghi sono disponibili misure *in situ* radiometriche che di concentrazione di chl-a, utili alla validazione dei prodotti satellitari. Nell'area sono disponibili i parametri atmosferici delle rete AERONET (*AERosolROboticNETwork*), nelle stazioni di Ispra -VA- e Sirmione -BS-, utilizzate nel processamento delle immagini per la descrizione dell'aerosol atmosferico.

### Materiali e metodi

Quattro immagini L8 e cinque immagini S2, sincrone alle misure *in situ*, sono state corrette atmosfericamente ed i valori di Rrs così ottenuti sono stati comparati e validati con le misure radiometriche *in situ*, utilizzando diversi algoritmi e i diversi approcci che è possibile scegliere per ogni algoritmo di correzione atmosferica. Per la stima della Rrs si sono utilizzati gli output del codice 6SV (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum – Vector*, Vermote et al., 2006) ed i software ATCOR (Richter et al., 2014), ACOLITE (*atmospheric correction for OLI lite*, Vanhellemont et al., 2016) per L8 e S2, il *toolL2gen* del software SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*) per le immagini L8 (Franz et al., 2015) e SEN2COR (Müller-Wilm et al., 2013) per le immagini S2.

Il 6SV, è un codice di trasferimento radiativo, nato per la simulazione del trasferimento del segnale da terra al sensore, per la compilazione delle *look-up table* del sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Può essere utilizzato anche in modalità inversa per stimare i parametri di correzione atmosferica. Il profilo dell'atmosfera, così come concentrazione e composizione dell'aerosol, può essere descritto sia attraverso modelli di default, o predefiniti dall'utente sia in termini di composizione, che attraverso le proprietà microfisiche degli aerosol derivanti dalle misure *in situ* della rete AERONET (Bassani et al., 2015), ovvero distribuzione delle dimensioni delle particelle e indice di rifrazione. In questo lavoro si sono utilizzati per i prodotti definiti '6SV\_standard' i valori *Aerosol Optical Depth* (AOD) a 550nm (Tabella 1) estrapolati dalle misure AERONET, ed un modello predefinito di aerosol (Tabella 2), con il profilo atmosferico 'midlatitudesummer'; per i prodotti chiamati '6SV\_cimel' (dal nome del fotometro installato nelle stazioni) si sono invece utilizzati, oltre al valore di AOD, la microfisica dell'aerosol, la concentrazione di ozono e di acqua precipitabile nella colonna atmosferica fornita da AERONET (Tabella 1). Per ottenere il valore di Rrs, i valori di riflettanza  $\rho_w$ , ottenuti utilizzando l'equazione (Vermote et al., 2016):

$$\rho_w(\lambda) = \frac{L_{toa}(\lambda)x_a(\lambda) - x_b(\lambda)}{1 + x_c(\lambda)(L_{toa}(\lambda)x_a(\lambda) - x_b(\lambda))} \quad [Eq. 1]$$

dove  $L_{toa}$  è la radianza misurata al sensore, e  $x_a$ ,  $x_b$  e  $x_c$  sono coefficienti forniti in output dalle simulazioni 6SV, sono stati corretti dall'effetto di riflessione speculare (il contributo del segnale dovuto alla riflessione da parte dell'acqua della radianza del cielo) e divisi per  $\pi$ .

Tabella 1–AOD estrapolato a 550 nm, concentrazione di ozono e acqua precipitabile dalle stazioni AERONET di Ispra e di Sirmione.

Data	Lago	AOD	Ozono[cm-atm]	Acqua [g/cm <sup>2</sup> ]
10/4/2015	Garda	0.314	0.330	1.23
15/7/2015	Garda	0.880	0.321	3.67
22/7/2015	Maggiore	0.346	0.287	3.58
22/5/2016	Garda	0.152	0.359	2.00
8/6/2016	Garda	0.337	0.349	2.59
1/7/2016 – L8	Garda	0.283	0.336	3.35
1/7/2015 – S2	Garda	0.273	0.336	3.34
28/7/2016	Mantova	0.040	0.322	3.20
17/8/2016	Garda	0.095	0.312	2.96

Tabella 2 – Composizione del modello di aerosol utilizzato come modello standard per tutti ilaghi subalpini.

Componente	Dust-like	Water-soluble	Oceanic	Soot
Percentuale	40%	44%	5%	11%

Il software **ACOLITE** stima invece il contributo aerosolico in base al segnale nelle bande del vicino e del medio infrarosso (NIR o SWIR), dove l'acqua è supposta essere completamente assorbente, ed il segnale è attribuito interamente alla presenza di aerosol. In base alla coppia di bande scelta (in questo lavoro si sono testate entrambe le opzioni con le bande 655 e 865 nm (NIR) o 1609 e 2201 nm (SWIR), rispettivamente), la tipologia dell'aerosol viene definita in base al loro rapporto  $\epsilon$ , costante sull'area selezionata o variabile per ogni pixel (nei grafici indicata con il suffisso 'EPS-VAR').

Il software **ATCOR** è basato sul codice di trasferimento radiativo MODTRAN per il calcolo delle *look-up table* usate per la correzione atmosferica. La parametrizzazione degli aerosol è possibile attraverso quattro diversi modelli predefiniti di aerosol, per ciascuno dei quali è possibile definire la quantità d'acqua presente nella colonna atmosferica. La visibilità (parametro inverso alla concentrazione di aerosol), così come la concentrazione di vapore acqueo può essere sia prefissata dall'utente che stimata dall' algoritmo a partire dall'immagine. In questo lavoro l'algoritmo è stato testato sulle immagini del lago Maggiore e di Mantova, con la visibilità e vapore acqueo variabile stimata dall'algoritmo e con il modello di aerosol predefinito 'Rural'.

**L2gen** è un *tool* per la generazione dei prodotti di secondo livello (fra cui la Rrs) del software SeaDAS, originariamente nato a supporto della missione SeaWIFS ed ora esteso a tutte le missioni NASA, compreso L8. Per la definizione dell'aerosol si è selezionato il metodo definito da Gordon e Wang (Gordon et al., 1994) con le bande a 865 and 2201 nm (Franz et al., 2015).

**SEN2COR** è un processore dedicato alla correzione atmosferica delle immagini S2 del software SNAP dedicato alle missioni ESA. Per la correzione atmosferica utilizza una versione adattata di ATCOR con delle *look-up table* generate attraverso libRadtran, con un modello di aerosol rurale/continentale fisso per tutte le immagini.

I valori di Rrs ottenuti sono stati validati confrontandoli con misure radiometriche *in situ* sincrone al passaggio del sensore.

Per ogni lago si è effettuata un'analisi sia qualitativa della chiusura ottica delle firme di Rrs stimate con quelle di campo ed una statistica con l'errore quadratico medio (RMSE) il parametro  $\chi^2$ , attraverso il quale si è in grado di descrivere l'accordanza/discordanza delle firme sia in termini di intensità che di forma (della firma), ricampionando le misure *in situ* rispetto alle bande S2 e L8.

$$\chi^2 = \sum_{\lambda=1}^{n.bands} \frac{(Rrs_{satellite} - Rrs_{in situ})^2}{Rrs_{in situ}} [2]$$

Per la chiusura ottica per ogni immagine si è considerata la media dei valori in tutte le stazioni libere da nubi, estratti in ogni stazione con una finestra di 3x3 pixel, mentre per le analisi statistiche si sono considerate tutte le stazioni singolarmente.

Infine, a titolo di esempio sono stati utilizzati i prodotti Rrs ottenuti con i diversi approcci, per valutare l'impatto della correzione sui prodotti di chl-a per un'immagine L8 del Lago Maggiore e una S2 per i Laghi di Mantova per la stima della concentrazione di chl-a. Si è utilizzato un approccio semi-analitico parametrizzando il modello bio-ottico **BOMBER** (Giardino et al., 2012) per il Lago Maggiore ed un algoritmo semi-empirico adattivo, basato su rapporti di banda ricampionati alle caratteristiche spettrali di Sentinel-2 per la stima della chl-a in ambienti eutrofici (INFORM, 2016), per i Laghi di Mantova. Nelle campagne di misura sul campo, sono stati utilizzati alternativamente gli strumenti WISP-3 e ASD FR, radiometri iperspettrali che permettono di effettuare misure sia di radianza che di irradianza della superficie acquatica e del cielo, dai quali è possibile ottenere i valori di Rrs secondo la seguente equazione:

$$Rrs(\lambda) = \frac{L_u(\lambda) - \rho_{sky} L_d(\lambda) C_a}{Ed(\lambda) + C_b} [3]$$

dove  $L_u$  è la radianza della superficie,  $L_d$  è la radianza del cielo,  $\rho_{sky}$  è pari a 0.028 e  $C_a$  e  $C_b$  sono due fattori correttivi che tengono conto della velocità del vento e quindi dell'increspatura della superficie. I campioni di acqua raccolti in alcune stazioni di misure sono stati filtrati e la concentrazione di chl-a è stata estratta con acetone (Lorenzen, 1967).

## Risultati

### Lago di Garda

Come mostrato in Figura 1 e in Tabella 3, per il Lago di Garda i migliori risultati si sono ottenuti con il software ACOLITE, utilizzando le bande NIR per la correzione atmosferica, in termini di magnitudine e i coefficienti forniti da 6SV parametrizzato attraverso le proprietà microfisiche dell'aerosol delle stazioni AERONET ('6SV\_cimel' nei grafici), in termini di forma.

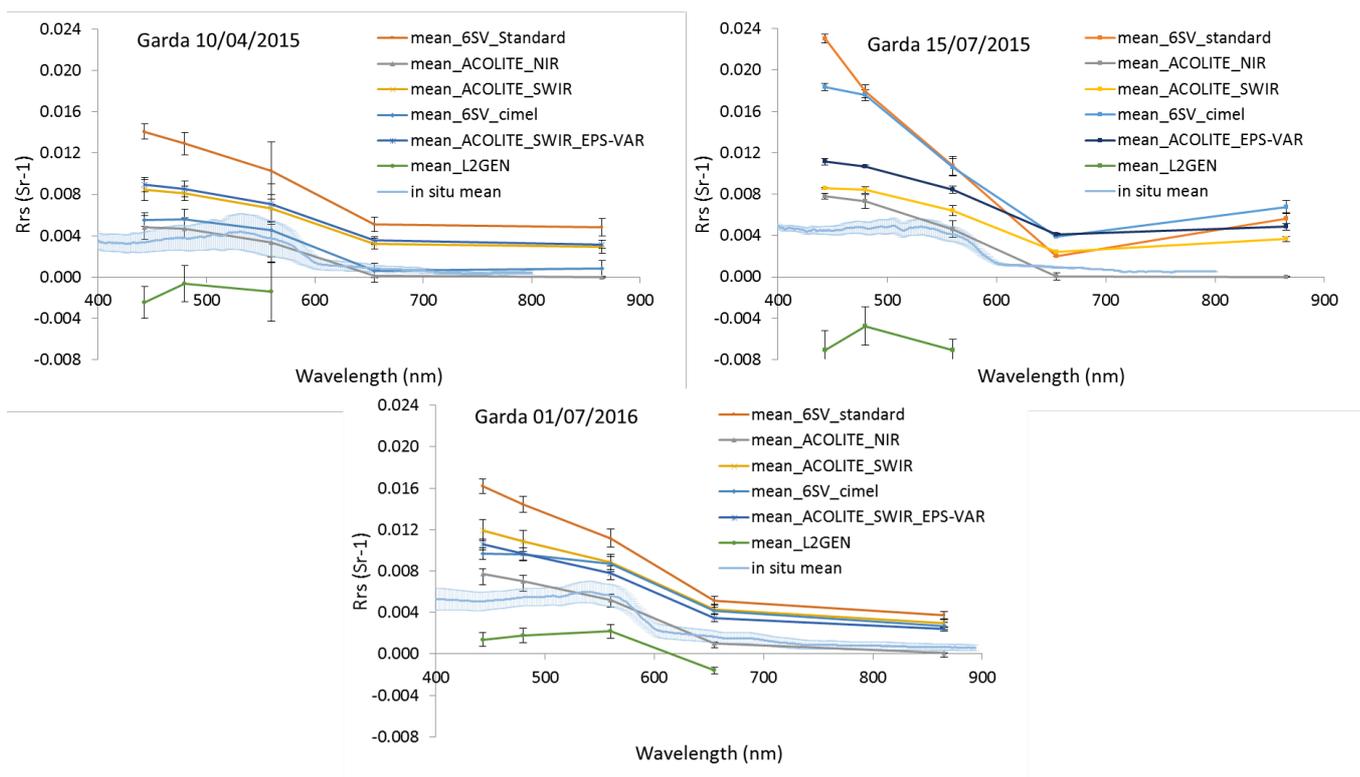


Figura 1 -Chiusura ottica per le tre immagini L8 del Lago di Garda. Per ogni approccio si è riportata media e deviazione standard delle stazioni disponibili e delle corrispondenti misure in situ.

Tabella 3 - RMSE e  $\chi^2$  calcolati su tutte le stazioni disponibili per le tre immagini L8 sul Lago di Garda. \*NB:  $\chi^2$  per L2gen-SeaDAS è calcolato su tre bande anziché quattro.

	$\chi^2$	RMSE			
		B1	B2	B3	B4
<b>6SV_cimel</b>	0.0177	0.0054	0.0049	0.0033	0.0017
<b>6SV_STANDARD</b>	0.1053	0.0121	0.0099	0.0071	0.0041
<b>ACOLITE_NIR</b>	0.0042	0.0026	0.0020	0.0009	0.0008
<b>ACOLITE_SWIR</b>	0.0321	0.0060	0.0051	0.0038	0.0026
<b>ACOLITE_EPS-VAR</b>	0.0331	0.0060	0.0052	0.0039	0.0027
<b>L2gen-SeaDAS</b>	0.0259*	0.0061	0.0048	0.0055	-

Risultati analoghi si sono ottenuti per le immagini S2 dove è stato più performante l’approccio SWIR (con  $\epsilon$  variabile per ogni pixel) del software ACOLITE.

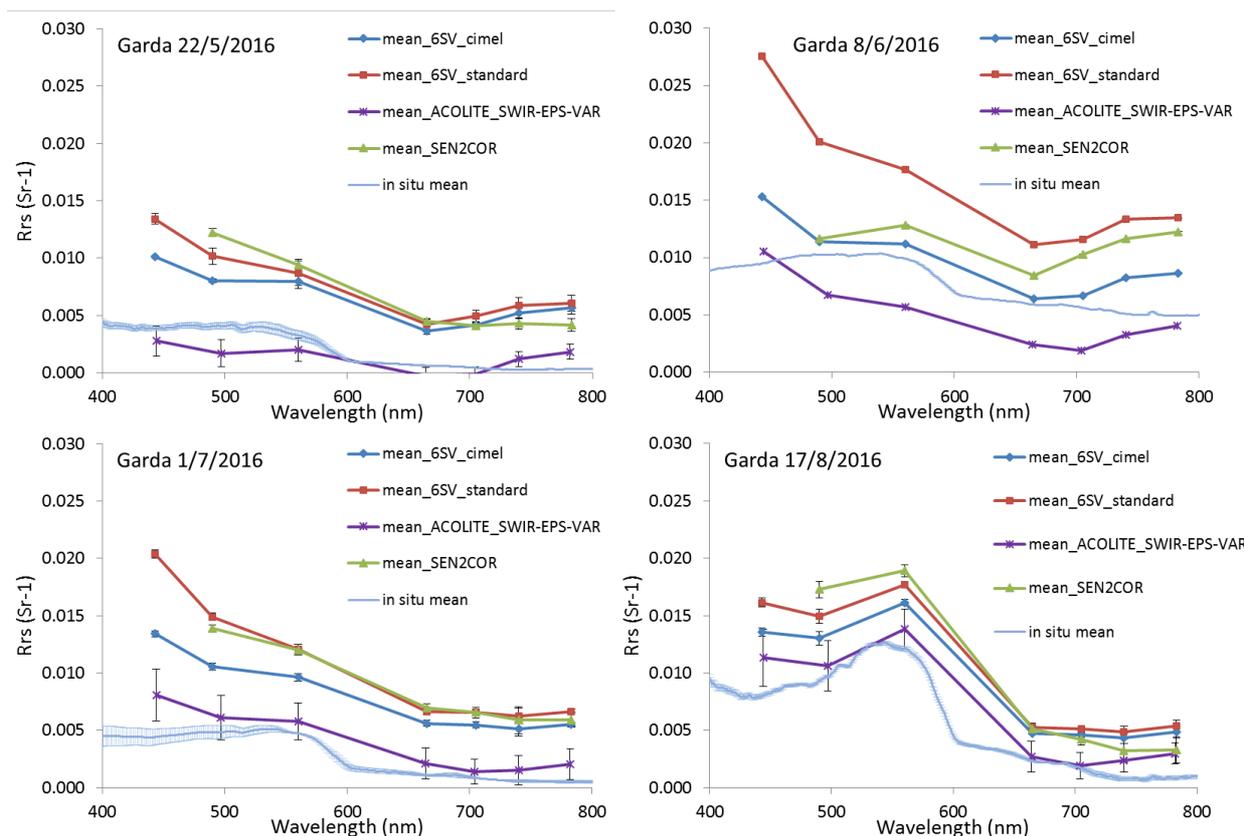


Figura 2 - Chiusura ottica per le quattro immagini S2 del Lago di Garda. Per ogni approccio si è riportata media e deviazione standard delle stazioni disponibili e delle corrispondenti misure in situ.

Tabella 4 - RMSE e  $\chi^2$  calcolati su tutte le stazioni disponibili per le quattro immagini S2 sul Lago di Garda. \*NB:  $\chi^2$  per SEN2COR è calcolato su sei bande anziché sette.

	$\chi^2$	RMSE						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
<b>6SV_cimel</b>	0.1631	0.0074	0.0049	0.0050	0.0042	0.0048	0.0055	0.0058
<b>6SV_STANDARD</b>	0.3623	0.0141	0.0093	0.0078	0.0060	0.0067	0.0075	0.0077
<b>ACOLITE_EPS-VAR</b>	0.3467	0.0035	0.0024	0.0025	0.0016	0.0015	0.0016	0.0019
<b>SEN2COR</b>	0.3030*	-	0.0081	0.0072	0.0053	0.0057	0.0057	0.0058

### Lago Maggiore

Sul lago Maggiore la stima migliore di Rrs è stata ottenuta attraverso l'uso dei coefficienti 6SV, parametrizzato secondo la microfisica degli aerosol ('6SV\_cimel'): particolarmente marcata per questa immagine è la differenza dei risultati di questa parametrizzazione, rispetto a quelli ottenuti con un modello atmosferico ed aerosolico predefinito ('6SV\_standard').

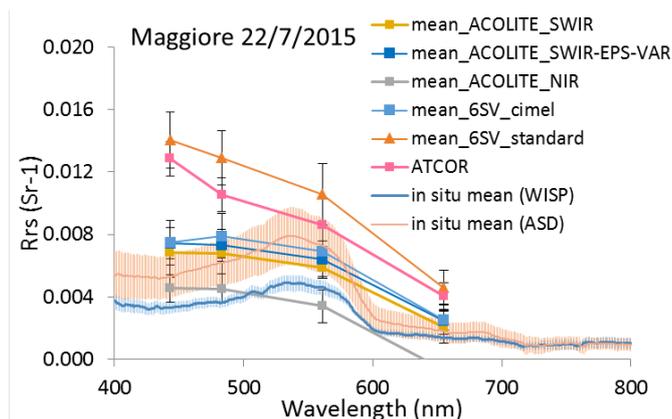


Figura 3 -Chiusura ottica per l'immagine L8 del Lago Maggiore del 22/7/2015. Per ogni approccio si è riportata media e deviazione standard delle stazioni disponibili e delle misure in situ. E' stata omessa la Rrs stimata da L2gen-SeaDAS, completamente negativa.

I prodotti di Rrs, sono stati utilizzati per produrre con il modello bio-ottico BOMBER le mappe di concentrazione di chl-a, ed i valori stimati sono stati validati con le misure *in situ*. I risultati, in Tabella 5, mostrano come la miglior forma dei prodotti '6SV\_cimel' abbia permesso di ottenere i migliori risultati anche in termini di concentrazione di chl-a.

Tabella 5 – Concentrazione di chl-a in mg/m<sup>3</sup> misurati in situ e stimati da BOMBER a partire dai valori di Rrs ottenuti con i diversi approcci.

Stazione	In situ	6SV cimel	6SV standard	ACOLITE SWIR-EPS-VAR	ACOLITE NIR	ACOLITES WIR	ATCOR
St.A	1.50	1.45	0.84	1.66	1.29	1.17	1.20
St.B	1.73	1.65	0.98	1.57	1.27	1.21	1.22

### Lago di Mantova

Il grafico di Figura 4 mostra le firme spettrali ottenute con le differenti procedure confrontate con le misure *in situ*.

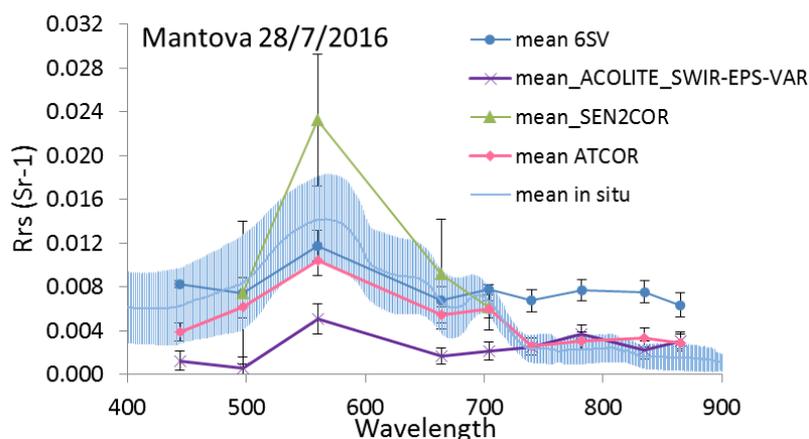


Figura 4 - Chiusura ottica per l'immagine S2 del Lago di Mantova del 28/7/2016. Per ogni approccio si è riportata media e deviazione standard delle stazioni disponibili e delle corrispondenti misure in situ.

Tutte le correzioni denotano come, per acque torbide come quelle dei laghi di Mantova, la firma spettrale nella regione del visibile presenti una forma simile a quella misurata *in situ*. In particolare, le firme ottenute con ATCOR e con i coefficienti 6SV sono in buon accordo, sia a livello di magnitudo che di forma, con quelle *in situ*, ed entrambi i codici riescono, nella regione compresa tra

i 680-710 nm, a cogliere il picco dovuto alla presenza di chl-a nelle acque. A differenza dei prodotti 6SV, il software ATCOR riesce a rimuovere il contributo atmosferico anche nella regione del NIR. I risultati ottenuti dall'applicazione dell'algoritmo semi-empirico adattivo sui differenti prodotti Rrs di Mantova, hanno evidenziato come la correzione atmosferica con i coefficienti 6SV e il software ATCOR siano in grado di fornire firme spettrali che permettano di ottenere prodotti accurati di concentrazione di chl-a, sia in zone ad elevato stato trofico (*in situ*  $36 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ ; ATCOR  $38 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ; 6SV  $41 \pm 6 \text{ mg/m}^3$ ) sia in zone meno produttive (*in situ*  $8 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ; ATCOR  $9 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ ; 6SV  $15 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ). I risultati ottenuti con SEN2COR non sono utilizzabili per questa immagine poiché non è presente il picco a 700 nm, mentre ACOLITE permette una buona stima nelle zone ad elevata torbidità e ridotte concentrazioni di chl-a (*in situ*  $8 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ; ACOLITE  $10 \pm 2 \text{ mg/m}^3$ ) ma sovrastima la concentrazione nelle zone ad elevato stato trofico (*in situ*  $36 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ ; ACOLITE  $55 \pm 10 \text{ mg/m}^3$ ).

### Ringraziamenti

Si ringrazia Giuseppe Zibordi per il mantenimento della stazione AERONET di Ispra.

Il progetto BLASCO è finanziato dalla Fondazione CARIPLO (CARIPLO Rif. 2014-2019).

Le attività sono inserite anche nel progetto INFORM (*grant agreement* No. 606865) finanziato dalla Comunità Europea *Framework Programme 7* (FP7/2007-2013).

### Riferimenti bibliografici

- Bassani C. et al. (2015), "The Impact of the Microphysical Properties of Aerosol on the Atmospheric Correction of Hyperspectral Data in Coastal Waters", *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1593–1604.
- 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.
- Bryan A.F., Bailey S.W., Kuring N., Werdell P.J. (2015), "Ocean Color Measurements with the Operational Land Imager on Landsat-8: Implementation and Evaluation in SeaDAS", *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1):96070.
- Giardino C. et al. (2012), "BOMBER: A Tool for Estimating Water Quality and Bottom Properties from Remote Sensing Images", *Computers and Geosciences*, 45:313–18.
- Gordon H. R., Wang M. (1994), "Retrieval of Water-Leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness over the Oceans with SeaWiFS: A Preliminary Algorithm", *Applied Optics*, 33(3):443–52.
- INFORM (2016), "Inform Algorithms Theoretical Basis Document, Improved monitoring and forecasting of ecological status of European INland waters by combining Future earth ObseRvation data and Models", (INFORM) FP7 Project: 158.
- Lorenzen C.J. (1967), "Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations", *Limnology and Oceanography*, 12(2):343–46.
- Müller-Wilm U., Louis J., Richter R., Gascon F., Niezette M. (2013), "Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results", in *ESA Living Planet Symposium 2013*, Edinburgo.
- Richter R., Schläpfer D. (2014), "Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery", *DLR Report DLR-IB*, 565–02/14:231.
- Tyler A.N., Hunter P.D., Spyarakos E., Groom S., Constantinescu A.M., Kitchen, J. (2016), "Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters", *Science of The Total Environment*.
- Vanhellemont Q., Ruddick K. (2016), "ACOLITE for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery", in *Living Planet Symposium 2016*, Praga.
- Vermote E.F. et al. (2006), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview", *6S User Guide Version 3*.