Integrazione tra Dati Limnologici In Situ e Osservazioni Satellitari Multi-Sensore per il Monitoraggio dei Laghi Subalpini Italiani

Nicola Ghirardi[1,2], Raffaella Frank[1], Monica Pinardi[1], Salvatore Mangano[1], Anna Joelle Greife[1,3], Claudia Giardino[1], Mariano Bresciani[1]

[1] CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Via Alfonso Corti 12, 20133 Milano, Italia (ghirardi.n@irea.cnr.it, frank.r@irea.cnr.it, pinardi.m@irea.cnr.it, mangano.s@irea.cnr.it, greife.j@irea.cnr.it, giardino.c@irea.cnr.it, bresciani.m@irea.cnr.it)
[2] CNR – Istituto per la BioEconomia, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italia
[3] Università di Milano – Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, Via Giovanni Celoria, 2, 20133 Milano, Italia

Abstract. Gli ecosistemi lacustri sono attualmente sottoposti a pressioni antropiche e climatiche, rendendo prioritario un monitoraggio efficace. L'integrazione tra dati satellitari e misurazioni in situ fornisce informazioni cruciali per la caratterizzazione e la tutela della qualità delle acque. Inoltre, l'utilizzo congiunto di diversi sensori ottici satellitari consente di valutare la variabilità intragiornaliera di alcuni parametri chiave, quali la concentrazione di clorofilla-a e solidi sospesi.

Parole chiave: Telerilevamento, Limnologia, Laghi subalpini, Qualità delle acque.

1 Introduzione

I laghi subalpini sono attualmente sottoposti a crescenti pressioni antropiche, tra cui il turismo intensivo, l'eutrofizzazione e gli impatti sempre più marcati dei cambiamenti climatici. Tali fattori di stress stanno compromettendo gli ecosistemi d'acqua dolce favorendo la comparsa sempre più frequente di fioriture algali e cianobatteriche, compromettendo la biodiversità e la qualità complessiva delle acque. Per affrontare queste criticità si rende necessario lo sviluppo di sistemi di monitoraggio efficaci, continuativi e integrati. In questo contesto si inseriscono diversi progetti di ricerca nazionali e internazionali volti a coniugare le innovative tecniche di telerilevamento con la gestione ambientale legata alla limnologia classica.

Il Progetto DiMark è un'iniziativa transnazionale focalizzata sulla regione alpina e subalpina con l'obiettivo di migliorare la gestione delle acque dolci, l'adattamento climatico e la prevenzione dei rischi idrici. A tale scopo si propone di integrare dati limnologici tradizionali misurati in situ ed osservazioni satellitari per sviluppare strumenti di visualizzazione e modelli di preallarme per il rischio cianobatterico, a supporto delle decisioni di enti pubblici e gestori del territorio.

Il Progetto Space It Up è invece un programma di ricerca nazionale finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiani e dal Ministero dell'Università e della Ricerca, volto a rafforzare le competenze scientifiche e tecnologiche dell'Italia nel settore spaziale. Nell'ambito dello Spoke 7, dedicato allo sviluppo di tecnologie per il monitoraggio ambientale e la sostenibilità, l'attività del nostro gruppo di ricerca si inserisce nella sperimentazione di metodologie innovative per la stima degli indicatori della qualità dell'acqua e per l'analisi delle dinamiche ambientali in contesti lacustri caratterizzati da diverse proprietà ottiche.

Il progetto AQST lago di Varese, finanziato da Regione Lombardia, mira alla salvaguardia e al risanamento del lago di Varese, con il fine di raggiungere il buono stato chimico ed ecologico delle acque tramite approfondimenti tecnico-scientifici e interventi infrastrutturali mirati. In questo contesto, l'attività di monitoraggio prevede la mappatura della distribuzione delle macrofite e della concentrazione di clorofilla-a da immagini satellitari, consentendo un'analisi spazio-temporale dei produttori primari.

Il presente lavoro si colloca a cavallo di questi progetti, combinando dataset limnologici in situ ed osservazioni satellitari multi- e iperspettrali per valutare l'efficacia del telerilevamento nel monitoraggio della qualità delle acque lacustri. Nello specifico gli obiettivi principali sono: I) Valutare il grado di concordanza tra misure limnologiche in situ (temperatura superficiale dell'acqua, trasparenza e concentrazione di clorofilla-a) e prodotti satellitari multispettrali a lungo termine, con un focus su due laghi target italiani (Como e Garda). II) Valutare un approccio multi-sensore basato sull'integrazione di immagini multi- e iperspettrali per catturare eventuali variazioni intragiornaliere dei parametri di qualità dell'acqua (concentrazioni di clorofilla-a e solidi sospesi) sui laghi di Garda e Varese.

2 Materiali & Metodi

2.1 Aree di studio

Per questo studio sono state selezionate tre aree di studio italiane: i laghi di Como, Garda e Varese (Fig. 1).

Il Lago di Como è uno dei più grandi laghi subalpini profondi del Nord Italia (45.990° N, 9.262° E). Caratterizzato da una superficie di 146 km^2 e un volume d'acqua di 22.5 km^3, raggiunge una profondità media di 154 m. A causa della sua morfologia e delle condizioni climatiche locali, nei periodi più caldi dell'anno si sviluppa una marcata stratificazione termica, mentre la miscelazione completa si verifica solamente in corrispondenza di inverni particolarmente rigidi [2]. Sotto il profilo trofico, il Lago di Como è classificato come meso-eutrofico, con concentrazioni primaverili di fosforo totale pari a circa 25 mg m^{-3} [3].

Con una superficie di 368 km^2 e un volume d'acqua di 49 km^3, il Lago di Garda costituisce il maggior bacino italiano e rappresenta uno dei principali laghi subalpini profondi del Nord Italia (45.633° N, 10.667° E). Dal punto di vista morfologico, la porzione settentrionale raggiunge una profondità massima di 350 m, mentre il settore meridionale si allarga in un bacino più ampio e meno profondo, caratterizzato da una profondità media di 65 m. Il regime termico è caratterizzato dalla formazione estiva

della termoclina, mentre la circolazione olo-omomittica si verifica solo durante gli inverni più rigidi e ventosi [4]. Classificato come lago oligo-mesotrofico, il Garda presenta marcate fluttuazioni stagionali della qualità dell'acqua: la concentrazione di clorofilla-a può variare da 0.5 mg m^{-3} in inverno fino a picchi estivi di 12 mg m^{-3}, mentre la concentrazione di solidi sospesi oscilla tra 0.1 e i 5.5 g m^{-3} [5].

Infine, il Lago di Varese è un bacino prealpino di origine glaciale situato anch'esso in Nord Italia (45.817° N, 8.733° E), caratterizzato da una superficie di circa 14.8 km^2 e una profondità media di 10.7 m. A causa della ridotta profondità e della conformazione del bacino, il lago sviluppa una marcata stratificazione termica estiva, seguita da una miscelazione completa delle acque nei mesi invernali. Sotto il profilo trofico, nonostante i continui sforzi di gestione, il lago rimane eutrofico, con ricorrenti fioriture algali e condizioni di ipossia nei mesi più caldi [5].

2.2 Confronto tra i prodotti DiMark e Alplakes

Per la validazione dei prodotti satellitari nei laghi di Como e Garda sono stati utilizzati i dati raccolti in situ ed integrati all'interno del dataset DiMark. Questo archivio raccoglie misure relative a 42 laghi e comprende 11 differenti parametri limnologici misurati nell'arco temporale compreso tra il 1974 e il 2025.

Ai fini del presente studio sono stati selezionati tre parametri chiave per il monitoraggio della qualità delle acque: la temperatura superficiale dell'acqua (LSWT), la trasparenza misurata tramite disco di Secchi (SD) e la concentrazione di clorofilla-a (CHL). Questi dati in situ sono stati confrontati con i prodotti satellitari estratti dalla piattaforma Alplakes, contenente osservazioni acquisite da sensori ottici quali Sentinel-2 MSI (S2), Sentinel-3 OLCI (S3) e da sensori termici quali Landsat-8 TIRS (L8) e Landsat-9 TIRS-2 (L9).

L'estrazione dei valori satellitari in corrispondenza delle stazioni di campionamento in situ è stata effettuata definendo una regione di interesse (ROI) centrata sulle coordinate geografiche dei dati in situ, con una finestra spaziale di 3x3 pixel. Per garantire un confronto robusto dal punto di vista statistico, sono stati considerati validi i match-up caratterizzati da una discrepanza massima temporale di ±2 giorni. L'accuratezza dei confronti è stata valutata mediante le seguenti metriche statistiche: il coefficiente di correlazione di Pearson (r), il Mean Absolute Error (MAE), il Root Mean Square Error (RMSE) e il Median Absolute Percentage Error (MdAPE).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i-y_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MdAPE = \text{median}\left(\left|\frac{y_i-x_i}{x_i}\right| 100\%\right), i = 1, \dots N \quad (4)$$

dove x_i rappresenta i valori in situ, y_i rappresenta i valori satellitare derivati da Alplakes, e n rappresenta il numero totale di osservazioni.

2.3 Analisi delle dinamiche intra-giornaliere

Per cogliere le dinamiche intra-giornaliere dei laghi di Garda e Varese sono state impiegate immagini ottiche satellitari acquisite da diversi sensori multi- e iperspettrali. Le caratteristiche tecniche di ciascun sensore sono riassunte nella Tabella 1.

Tab. 1. Caratteristiche principali dei sensori utilizzati in questo studio.

Satellite	Sensore	Risoluzione spaziale	Numero di bande	Risoluzione spettrale	Tempo di rivisitazione
PRISMA	PRISMA	30 m	55	10-12 nm	7-29 giorni
EnMap	EnMap	30 m	79	6.5-10 nm	4-27 giorni
ISS	EMIT	60 m	70	7.4 nm	3-5 giorni
PACE	OCI	1000 m	159	5 nm	1 giorno
Landsat-8	OLI	30 m	5	10-20 nm	16 giorni
Landsat-9	OLI+	30 m	5	10-20 nm	16 giorni
Sentinel-2	MSI	10 m	9	20-30 nm	5 giorni
Sentinel-3	OLCI	300 m	15	5-20 nm	1 giorno
Aqua	MODIS	1000 m	10	5-13 nm	1-2 giorni
Terra	MODIS	1000 m	10	5-13 nm	1-2 giorni
SNPP	VIIRS	750 m	5	20-21 nm	1 giorno
JPSS	VIIRS	750 m	5	18-20 nm	1 giorno

L'approccio metodologico applicato nel presente lavoro è stato originariamente sviluppato da Ghirardi et al. (2026) sul Lago Trasimeno [6]. La catena di elaborazione prevede l'acquisizione del dato satellitare grezzo, l'applicazione della correzione atmosferica per la stima delle Remote Sensing Reflectances (Rrs) e la successiva implementazione di un modello bio-ottico per generare mappe di concentrazione dei parametri di qualità dell'acqua.

Per valutarne la scalabilità, la metodologia è stata estesa a bacini caratterizzati da differenti condizioni trofiche. Nello specifico, la selezione delle date definitive è stata effettuata sulla base di tre criteri principali: la presenza di almeno un'immagine iperspettrale, condizioni meteorologiche favorevoli (assenza o ridotta copertura nuvolosa) e la disponibilità simultanea di almeno due immagini multispettrali per la medesima giornata. In dettaglio, sono state identificate 11 date per il Lago di Garda e 6 date per il Lago di Varese nel periodo compreso tra il 2020 e il 2025.

Analogamente a quanto svolto per il Lago Trasimeno, i prodotti iperspettrali (PRISMA, EnMap, PACE) e le immagini MODIS e VIIRS, sono state acquisite come prodotti L2 (già corretti atmosfericamente). Al contrario, i dati S3, S2 e Landsat 8/9 sono stati scaricati come L1 e successivamente sottoposti a correzione atmosferica

mediante algoritmi specifici: POLYMER [7,8] per S3, Sen2Water [9] per S2 e il codice di trasferimento radiativo 6SV [10] per i dati Landsat. Le immagini così elaborate sono state ritagliate spazialmente tramite uno shapefile relativo alle acque otticamente profonde, mascherando contestualmente i pixel contaminati da nuvole, ombre o glint superficiale. Ove necessario, i dati sono stati convertiti in Rrs dividendo per π.

Infine, la stima dei parametri di qualità dell'acqua quali CHL e SPM, è stata effettuata applicando ai dati Rrs il modello bio-ottico BOMBER [11], basato sui risultati di Lee et al. (1999) [12] per la ricostruzione delle proprietà ottiche della colonna d'acqua. Il modello è stato eseguito nella configurazione "deep water", in modo da escludere l'influenza del fondale dal segnale spettrale.

3 Risultati e Discussione

3.1 Confronto tra dati in situ e dati satellitari

I risultati ottenuti dal confronto tra i dati in situ presenti all'interno del dataset DiMark e i corrispondenti dati satellitari sono mostrati nella Tabella 2.

Dai risultati emerge una buona coerenza complessiva tra i dati satellitari e quelli in situ, con le migliori prestazioni registrate per la LSWT, che mostra una correlazione quasi perfetta in entrambi i laghi target. Al contrario, i restanti due parametri presentano un margine di errore relativo più elevato, con le metriche della CHL che evidenziano la maggiore dispersione e sovrastima soprattutto nei valori bassi, in particolare nel Lago di Como.

Tab. 2. Metriche statistiche ricavate dal confronto tra dati in situ e dati satellitari, con una discrepanza massima di ±2 giorni. LSWT (temperatura superficiale del lago), SD (profondità del Disco di Secchi) e CHL (concentrazione di clorofilla-a).

Lago/Parametro	N	MAE	RMSE	MdAPE	r Person
Como – LSWT [°C]	45	1.46	1.84	8.24	0.97
Como – SD [m]	27	1.98	2.48	24.42	0.84
Como – CHL [mg m^{-3}]	28	2.27	2.64	68.16	0.87
Garda – LSWT [°C]	67	1.25	1.86	4.54	0.97
Garda – SD [m]	68	1.46	1.79	16.45	0.70
Garda – CHL [mg m^{-3}]	58	0.76	0.93	25.23	0.54

3.2 Dinamiche intra-giornaliere per i laghi di Garda e Varese

L'efficacia dell'approccio multi-sensore ha mostrato dinamiche differenti in funzione del livello trofico dei bacini analizzati.

In un lago oligo-mesotrofico come il Garda, le condizioni di qualità dell'acqua si sono mantenute complessivamente stabili durante i giorni presi in analisi: le concentrazioni di SPM e CHL sono risultate basse e prive di variazioni evidenti intra-giornaliere. Ciononostante, le stime derivate dalle immagini multi- e iperspettrali hanno

evidenziato una notevole coerenza inter-sensore, confermando l'efficacia degli algoritmi di correzione atmosferica applicati e avvalorando la robustezza dell'approccio multi-sensore. In Figura 1 sono riportati un paio di esempi esplicativi.

I vantaggi di questo metodo si manifestano in modo più evidente in contesti eutrofici come il Lago di Varese, dove la qualità dell'acqua è notevolmente più dinamica. L'integrazione di più sensori satellitari ha infatti permesso di rilevare variazioni a breve termine in due giorni distinti. L'11 aprile 2025, la concentrazione di CHL ha registrato un moderato incremento nelle prime ore del mattino seguito da una graduale diminuzione (Fig. 2A), suggerendo una dinamica diurna potenzialmente legata alla risalita del fitoplancton dagli strati più profondi indotta dal vento o dalle correnti. Per contro, l'11 agosto 2025 è stato osservato un progressivo aumento della CHL tra le 9:20 UTC e le 14:15 UTC (Fig. 2B), che può essere riconducibile all'incremento dell'irraggiamento solare e della temperatura dell'aria, in accordo con quanto riportato da Schuback e Tortell (2019) [13]. Al contrario, le concentrazioni di SPM si sono mantenute sostanzialmente stabili in entrambe le giornate osservate.

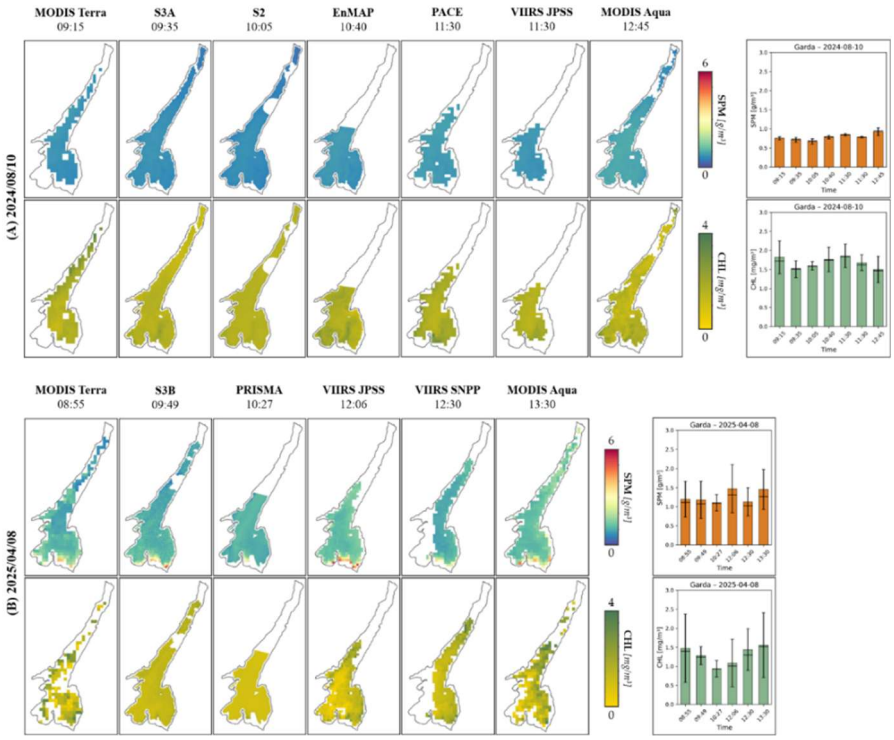

Fig. 1. Mappe di concentrazione di SPM e CHL per il Lago di Garda acquisite con diversi sensori multi- e iperspettrali in due date selezionate: 10/08/2024 (A) e 08/04/2025 (B). A destra sono riportati i valori medi, le mediane e le deviazioni standard delle concentrazioni.

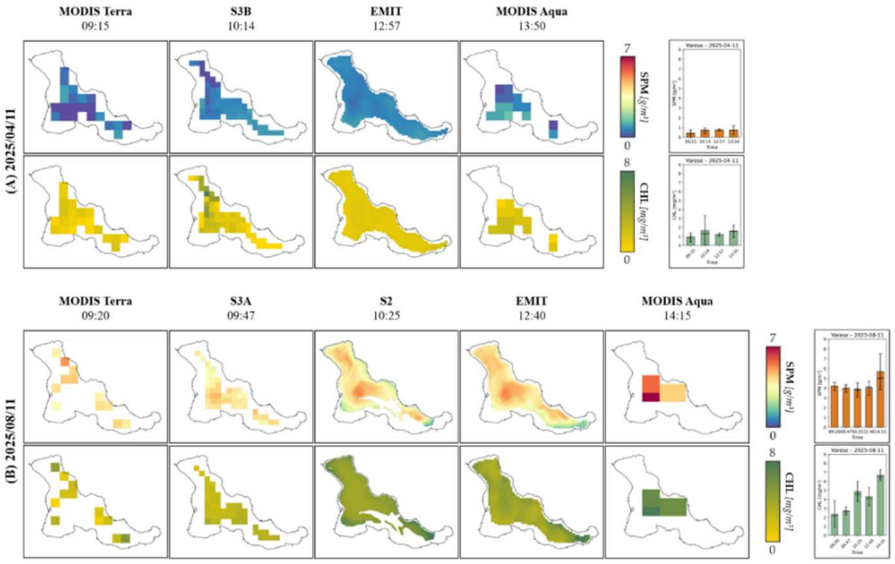

Fig. 2. Mappe di concentrazione di SPM e CHL per il Lago di Varese acquisite con diversi sensori multi- e iperspettrali in due date selezionate: 11/04/2025 (A) e 11/08/2025 (B). A destra sono riportati i valori medi, le mediane e le deviazioni standard delle concentrazioni.

4 Conclusioni

Il presente lavoro ha valutato la coerenza e l'efficacia dell'integrazione tra dati limnologici in situ e osservazioni satellitari multi- e iperspettrali per il monitoraggio della qualità delle acque in una serie di laghi target italiani.

Il confronto tra i dati in situ e quelli satellitari sui laghi di Como e Garda ha confermato l'elevata affidabilità del telerilevamento. In particolare, è emerso un ottimo accordo per la LSWT e una buona coerenza per la trasparenza e la concentrazione di CHL, sebbene per questi ultimi due parametri ci sia una maggiore dispersione dei dati.

L'analisi delle dinamiche intra-giornaliere ha evidenziato come, nei laghi oligotrofici, i parametri di CHL e SPM si mantengono stabili nell'arco della giornata, avvalorando la robustezza della correzione atmosferica e la scalabilità dell'approccio multi-sensore. In bacini eutrofici, la frequenza temporale garantita dalla combinazione di più sensori ha consentito invece di rilevare repentine variazioni intra-giornaliere della concentrazione di CHL.

A livello applicativo, la sfida principale risiede nella selezione di algoritmi di correzione atmosferica adeguati a ciascun sensore e area di studio. Una seconda priorità riguarda l'ampliamento del dataset di immagini disponibili, prospettiva che sarà a breve concretizzata da lancio di nuove missioni iperspettrali (es. CHIME).

Ringraziamenti

Il presente studio è stato condotto nell'ambito del progetto "Space It Up", finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) (contratto n. 2024-5-E.0 – CUP n. I53D24000060005). La ricerca è stata inoltre supportata e cofinanziata dal progetto DiMark, all'interno del programma Interreg Alpine Space, con il contributo dell'Unione Europea, dell'Ufficio federale svizzero per lo sviluppo territoriale e dei cantoni di Appenzello Interno, Lucerna, Nidvaldo, Svitto, Turgovia, Uri, Vallese, Zugo e Zurigo. Si ringrazia, infine, l'Accordo Quadro di Sviluppo Territoriale (AQST) Lago di Varese, finanziato da Regione Lombardia.

Riferimenti bibliografici

1. Alplakes Homepage, https://www.alplakes.eawag.ch/, ultimo accesso 2026/09/09.
2. Salmaso, N., & Mosello, R. Limnological research in the deep southern subalpine lakes: synthesis, directions and perspectives. Advances in Oceanography and Limnology, 1(1), 29-66 (2010).
3. Salmaso, N., Buzzi, F., Cerasino, L., Garibaldi, L., Leoni, B., Morabito, G., ... & Simona, M. Influence of atmospheric modes of variability on the limnological characteristics of large lakes south of the Alps: a new emerging paradigm. Hydrobiologia, 731(1), 31-48 (2014).
4. Salmaso, N. Vertical mixing as a determinant of trophic status in deep lakes: a case study from two lakes south of the Alps (Lake Garda and Lake Iseo). Journal of Limnology. (2003).
5. Premazzi, G., Dalmiglio, A., Cardoso, A.C., & Chiaudani, G. Lake management in Italy: the implications of the Water Framework Directive. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 8(1), 41-59 (2003).
6. Ghirardi, N., Bresciani, M., Fabbretto, A., Pellegrino, A., Panizza, L., Padula, R., ... & Giardino, C. Intra-day analysis of water quality parameters in a highly dynamic shallow lake from multiple satellite sensors. Water Quality Research Journal, 61(3), 223–246 (2026).
7. Steinmetz, F., Deschamps, P.Y., & Ramon, D. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. Optics express, 19(10), 9783-9800 (2011).
8. Steinmetz, F., & Ramon, D. Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI consistent ocean colour products using POLYMER. In Remote sensing of the open and coastal ocean and inland waters, 10778, 46-55 (2018).
9. Sen2Water GitHub, https://github.com/bcdev/sen2water.git, ultimo accesso 2026/09/09.
10. Vermote, E.F., Tanré, D., Deuze, J.L., Herman, M., & Morcette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 35(3), 675-686 (1997).
11. Giardino, C., Candiani, G., Bresciani, M., Lee, Z., Gagliano, S., & Pepe, M. BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images. Computers & Geosciences, 45, 313-318 (2012).
12. Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., and Patch, J.S. Hypespectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. Applied Optics, 38, 3831-3843 (1999).
13. Schuback, N., & Tortell, P.D. Diurnal regulation of photosynthetic light absorption, electron transport and carbon fixation in two contrasting oceanic environments. Biogeosciences, 16(7), 1381-1399 (2019).