

Il contributo del telerilevamento all'interno del Progetto EULAKES

Mariano Bresciani, Claudia Giardino, Erica Matta

CNR-IREA, via Bassini 15 Milano, Tel. 02 23699298, Fax 02 236999300
e-mail: bresciani.m; giardino.c@irea.cnr.it; erica.matta@gmail.com

Sommario

Il progetto EULAKES (European Lakes Under Environmental Stressors) finanziato dal Central Europe Programme 2010-2013, prevede lo studio di quattro laghi europei: Garda (Italia), Charzykowskie (Polonia), Neusiedl (Austria) e Balaton (Ungheria). Obiettivo del progetto è studiare la vulnerabilità di alcuni laghi a diversi tipi di rischio per offrire strumenti atti a migliorare la pianificazione e gestione delle risorse. Si punta a creare un Sistema informatico per il supporto alle decisioni che offrirà un repertorio delle possibili misure che possono essere intraprese a tutela della qualità delle acque.

All'interno del progetto si sono valutate le caratteristiche di qualità delle acque dei quattro laghi con il contributo delle tecniche di telerilevamento. Il contributo ha previsto l'analisi della distribuzione spaziale dei pigmenti fotosintetici dei cianobatteri nel lago Charzykowskie; la mappatura delle macrofite del Garda tramite l'utilizzo d'immagini MIVIS e la *change detection*, tramite immagini Landsat, dei canneti del lago Neusiedl.

Al fine di valutare l'andamento della temperatura superficiale delle acque, dati di input per scenari previsionali futuri di global change, sono stati acquisiti circa 4800 prodotti MODIS 11A dal 2004 al 2010. L'analisi delle temperature ha permesso di valutare le differenze tra i laghi, i trend temporali e le differenze spaziali all'interno di ogni lago.

La valutazione delle caratteristiche dei parametri otticamente attivi (Clorofilla-a, Solidi sospesi totali, Sostanze gialle) e della trasparenza delle acque sono state ricavate dal processamento di oltre 250 immagini MERIS. Le immagini, acquisite seguendo le regole di monitoraggio della Water Frame Directive, sono state corrette per gli effetti di adiacenza (*tool* ICOL del *software* Beam-Visat dell'ESA) e per gli effetti atmosferici tramite l'applicazione di differenti software (codice 6S e Rete Neurale Beam). Ai dati in riflettanza, validati da misure spettroradiometriche di campo, sono stati applicati differenti algoritmi per la stima dei parametri di qualità delle acque. Per il lago di Garda è stato utilizzato l'algoritmo dell'ESA (*Case 2 Regional*), per i laghi Balaton e Neusiedl un algoritmo appositamente creato dalla media tra il *Case 2 Regional* e l'*Eutrophic* mentre per il lago Charzykowskie è stato utilizzato l'algoritmo *Eutrophic*.

I risultati ottenuti, validati tramite dati limnologici, hanno evidenziato le caratteristiche oligotrofiche del lago di Garda, meso-eutrofiche degli altri laghi, con il lago Neusiedl caratterizzato da elevata torbidità e presenza di sostanze organiche disciolte e il lago Charzykowskie caratterizzato da elevate fioriture di cianobatteri.

Abstract

EULAKES Project (European Lakes Under Environmental Stressors), funded by Central Europe Programme 2010-2013, includes four European lakes study: Garda Lake (Italy), Charzykowskie Lake (Poland), Neusiedl Lake (Austria) and Balaton Lake (Hungary). Aim of the Project is to evaluate lakes exposure to different type of risks in order to provide some useful tools to improve natural resources planning and management. The goal is to build an informatics system to support decision makers' purposes, which also provides a list of possible measures to be undertaken for water quality protection. Thanks to remote sensing techniques water quality characteristics have

been assessed. Our activity provided photosynthetic cyanobacteria specific pigments spatial distribution in Charzykowskie Lake, macrophyte mapping in Garda Lake using MIVIS images, and common reeds change detection in Neusiedl Lake through Landsat satellite images analysis. 4800 MODIS 11A products, from 2004 to 2010, have been acquired to evaluate surface water temperature trends, significant input data for future global change scenarios. Temperature analysis allowed the evaluation of lakes different characteristics, temperature temporal trends and temperature spatial variability inside each lake. Optical active parameters (Chlorophyll-a, Total Suspended Matter, Colored Dissolved Organic Matter), as well as water transparency, have been estimated from 250 MERIS images processing. Satellite images, acquired following Water Frame Directive monitoring rules, have been corrected for adjacent effects using ESA Beam-Visat software (ICOL tool). Atmospheric correction has been performed applying different softwares: 6S radiative transfer code and Beam Neural-Network. Different algorithms for the water quality parameters estimation have been applied to reflectance values, after their validation with spectroradiometric field measures. Garda Lake has been analysed with ESA Case 2 Regional algorithm, while for Balaton and Neusiedl lakes a new dedicated algorithm from Case 2 Regional and Eutrophic algorithms integration have been purposely created. Eutrophic algorithm has been used for Charzykowskie Lake. Results, validated through limnological data, highlighted Garda Lake's oligotrophic characteristics and other lakes' meso-eutrophic properties. Neusiedl Lake came out as highly turbid and colored organic dissolved matter rich lake, while Charzykowskie Lake is characterised by frequent cyanobacteria blooms.

Introduzione

Le tecniche di telerilevamento sono ampiamente utilizzate per la determinazione dei parametri di qualità delle acque dei laghi, sia a livello mondiale sia a livello europeo.

L'applicazione di queste tecniche in ambito europeo comprende differenti esempi, applicati sia allo studio dei laghi, sia alle riserve e sia agli ecosistemi lagunari.

Gli esempi più recenti di applicazione allo studio della qualità delle acque dei laghi riguarda lo studio dei laghi boreali (Strömbeck e Pierson 2001; Kutser et al., 2005; Voutilainen et al., 2007; Paavel et al., 2007); dei laghi perialpini (Keller 2001; Giardino et al., 2005; Albert and Peter 2006; Odermatt et al., 2008; Guanter et al., 2010; Bresciani et al., 2011a); dei laghi italiani (Giardino et al., 2007a; Bresciani et al., 2009; Giardino et al., 2010a); di piccoli laghi inglesi (George e Malthus 2001; Hunter et al., 2010a) e piccoli laghi e riserve in Belgio e Olanda (Dekker et al., 2001; Van Mol and Ruddick 2005).

Tra lo studio delle riserve d'acqua destinata all'uso umano sono da citare i lavori sulle riserve spagnole (Simis et al., 2007) e olandesi (Dekker et al., 2002); esempi di studi sugli ecosistemi lagunari sono sulla laguna della Curonia tra Lituania e Russia (Giardino et al., 2010b) e la laguna di Venezia in Italia (Alberotanza et al., 2006).

Le tecniche di telerilevamento sono attualmente capaci di produrre differenti tipologie di risultati utilizzabili per lo studio e la gestione degli ambienti acquatici, tra queste si possono citare: (1) dati per la Water Frame Directive (WFD) per il monitoraggio della qualità delle acque (Bresciani et al., 2011a) e dati relativi alla distribuzione spaziale delle macrofite acquatiche e le loro variazioni nel tempo (Giardino et al., 2007b; Hunter et al. 2010b); (2) dati in supporto alla definizione della scelta geografica delle stazioni di monitoraggio e le cadenze temporali di campionamento (Giardino et al., 2010a); (3) informazioni sulla comparsa e fine dei fenomeni di fioritura dei cianobatteri per la stima del rischio, derivante da questi fenomeni, nei confronti degli esseri umani (Hunter et al., 2009; Bresciani et al., 2011b); (4) classificazione dei laghi in accordo con le principali regole di classificazione delle acque (Koponen et al., 2004); (5) monitoraggio della temperatura superficiale delle acque e sua influenza nel determinare le caratteristiche trofiche delle acque, in collegamento anche alle condizioni meteo-climatiche (Reinart e Reinhold 2008; Bresciani et al., 2011c); (6) informazioni utili ai turisti relative ad immediati parametri di qualità delle acque come la trasparenza e la temperatura superficiale (Lella et al., 2011). Grazie al fatto che le immagini dei

sensori MERIS e MODIS sono disponibili in quasi real-time, le opportunità per i servizi d'informazione si estendono anche nel campo applicativo di preallarme per le calamità naturali.

I vantaggi della visione sinottica a multitemporale delle tecniche di telerilevamento, associate ad una buona accuratezza dei risultati, ha determinato un sempre maggior utilizzo delle immagini satellitari per lo studio, il monitoraggio e la gestione degli ecosistemi lacustri.

All'interno del progetto EULAKES il principale obiettivo dell'utilizzo delle immagini satellitari è stato quello di poter valutare lo stato di qualità delle acque dei laghi di Garda (Italia), Balaton (Ungheria), Neusiedl (Austria), Charzykowskie (Polonia) e di fornire dati di input per la creazione di scenari capaci di valutare come i cambiamenti climatici e globali possano condizionare lo stato di qualità delle acque e come la gestione della risorsa acqua debba essere effettuata per garantire la sua salvaguardia.

Per tutti e quattro i laghi sono stati ricavati i prodotti relativi alla concentrazione di clorofilla-a (chl-a) e solidi sospesi totali (TSM, in inglese *Total Suspended Matter*), all'assorbimento delle sostanze gialle (CDOM, in inglese *Colored Dissolved Organic Matter*), alla trasparenza (z90, strato eufotico rappresentante la penetrazione del 90% della luce incidente) e alla temperatura superficiale delle acque per il periodo compreso tra il 2004 e il 2010.

Area di Studio

I laghi inclusi nel Progetto EULAKES riguardano la zona centro-est europea (Figura 1) e comprendono laghi con caratteristiche morfologiche molto diversificate (Figura 2) ma con in comune strategie condivise di problematiche e gestione.

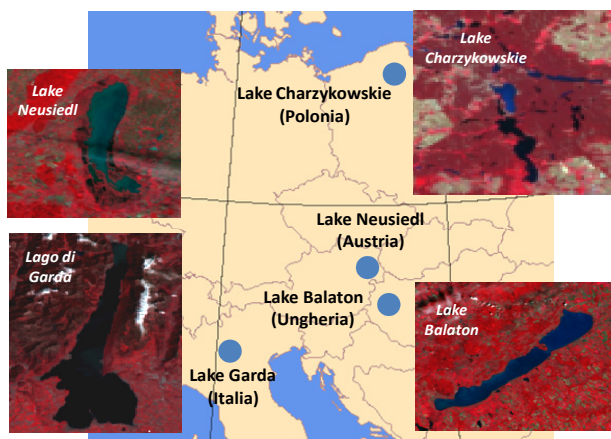


Figura 1 – Immagini LANDSAT TM in False Color (432) dei laghi studiati dal Progetto EULAKES.

	Garda	Neusiedl	Balaton	Charzykowskie
Latitudine N	45°42'	47°38'	46°50'	53°46'
Longitudine E	10°43'	16°41'	17°44'	17°30'
Altitudine lago (m s.l.m.)	65	116	105	120
Area del bacino (km²)	2290	1120	5182	30.36
Area del lago (km²)	368	315	593	13
Profondità media (m)	133	1.2	3.1	9.8
Profondità massima (m)	350	1.8	12.2	30.5
Volume (km³)	49	0.37	1.90	0.13

Figura 2 – Caratteristiche morfologiche dei laghi investigati.

Materiali e Metodi

I dati telerilevati consistono in 7500 immagini satellitari dei quattro laghi inclusi nel Progetto EULAKES, che spaziano dal 2004 al 2010. Le suddette immagini sono state acquisite dal sensore MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo della piattaforma satellitare Envisat, e dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dei satelliti Aqua e Terra. 4800 scene MODIS (MOD11A) con dati di temperatura superficiale, a risoluzione spaziale di 1 km, sono state fornite dalla NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) *Land Processes Distributed Active Archive Center*. Sono state utilizzate tutte le immagini MODIS-Terra prive di copertura nuvolosa. Le immagini MOD11A sono state utilizzate per valutare le temperature superficiali dei quattro laghi, dopo essere state ritagliate e ricampionate con una griglia regolare di 1-km di lato e georeferenziate nel sistema di proiezione nazionale Gauss Boaga. L'Agencia Spaziale Europea (ESA) ha, inoltre, fornito 273 immagini MERIS level-1B, con dati TOA (*Top Of Atmosphere Radiances*) a risoluzione spaziale di 300m.

A tutte le immagini MERIS FR (*Full Resolution*), 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, 2006). 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). Queste due correzioni sono state effettuate utilizzando il software BEAM (Basic Envisat e ERS (A) ATSR e MERIS) (Fomferra e Brockmann, 2006), attraverso il quale è stata effettuata anche la correzione atmosferica tramite rete neurale (Doerffer e Schiller, 2008). Tale software è particolarmente adatto per il calcolo automatico delle componenti otticamente attive delle acque lacustri caratterizzate da un'ampia variabilità trofica (es. Odermatt et al., 2010 e Giardino et al., 2010a).

La correzione atmosferica delle immagini è stata validata da misure di campo effettuate in tutti e quattro i laghi tramite misure spettroradiometriche (con lo spettroradiometro *Fieldspec Full Range Pro ASD Inc*) e tramite confronto con la correzione atmosferica effettuata con il codice *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)* (Vermote et al., 1997).

Per la stima delle concentrazioni di chl-a, TSM, CDOM e Z90 è stato utilizzato il software BEAM-VISAT v.4.2 dell'ESA in cui i differenti algoritmi utilizzabili (Figura 3) sono stati adattati ai diversi laghi in funzione delle loro caratteristiche trofiche. Per il lago di Garda è stato utilizzato l'algoritmo *Case2Regional* (C2R), per i laghi Neusiedl e Balaton è stato utilizzato un algoritmo dato dalla media di quello C2R e quello *Eutrophic* e per il lago Charzykowskie è stato utilizzato l'algoritmo *Eutrophic*.

	Boreal	Eutrophic	Case2Regional
Chl-a [mg/m ³]	0.5-50	1-120	0.003-50
TSM [g/m ³]	0.1-20	0.25-30	0.03-50
CDOM [m ⁻¹]	0.25-10	0.1-3	0.002-2

Figura 3 – Range di utilizzo dei differenti algoritmi BEAM.

Risultati

Le campagne di misura hanno permesso di valutare le differenti risposte spettrali delle acque dei laghi del Progetto (Figura 4) e le loro differenti caratteristiche trofiche (Figura 5).

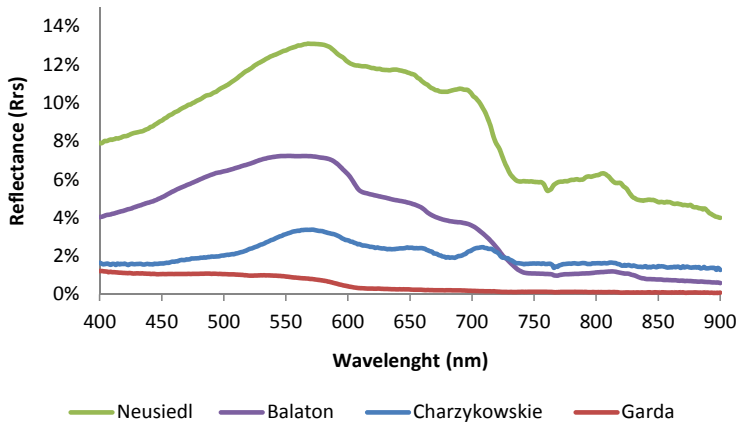


Figura 4 – Valori di Remote Sensing Reflectance (Rrs) medi acquisiti con lo spettroradiometro Fieldspec Full Range Pro ASD Inc acquisiti durante le campagne di misura.

	Data	Chl-a (mg/m ³)	TSM (g/m ³)	CDOM (m ⁻¹)	z90 (m)
Garda	27-28 Giugno	1.17 (1.1)	1.4 (0.7)	0.03 (0.02)	8.5 (2.8)
Balaton	17-18 Maggio	2.4 (1.3)	30.5 (4.5)	0.61 (0.14)	0.58 (0.13)
Neusiedl	11-12 Luglio	8.9 (3.5)	46.8 (10.5)	0.5 (0.1)	0.3 (0.03)
Charzykowskie	8-9 Agosto	19.20 (3.33)	9.10 (1.16)	0.39 (0.12)	0.88 (0.1)

Figura 5 – Valori limnologici medi delle differenti stazioni campionate nelle campagne di misura del 2011, tra parentesi i valori di deviazione standard.

La figura 4 evidenzia le diversità delle proprietà ottiche apparenti dei quattro laghi. In particolare emerge come il lago di Garda abbia acque molto trasparenti, tipiche di laghi oligotrofici. Questo dato è confermato anche dai valori di z90 e chl-a della figura 5. Il lago Neusiedl è caratterizzato da valori di riflettanza molto elevati in magnitudo, dovuti all'elevata concentrazione di TSM. Una situazione simile, ma meno marcata, caratterizza il lago Balaton. Il lago Charzykowskie risulta, invece, quello con una risposta spettrale maggiormente caratterizzata dalla componente fitoplanctonica, in particolare dai cianobatteri.

La correzione atmosferica applicata alle immagini MERIS, acquisite in sincrono alle misure radiometriche e limnologiche, hanno evidenziato una buona accuratezza e i differenti algoritmi applicati alle immagini hanno restituito una buona stima dei parametri di qualità delle acque. La validazione per il lago di Garda è riportata in Odermatt et al., (2010) e Bresciani et al., (2011a); per gli altri laghi le stime di TSM, z90 e CDOM hanno fatto registrare valori di RMSE minori del 10%. Per quanto riguarda la stima delle concentrazioni di chl-a, i valori di RMSE sono risultati compresi tra il 10% e il 20%; per il lago Balaton e il lago Charzykowskie la correlazione tra i valori di campo e quelli ottenuti dalle immagini MERIS è risultata avere un r^2 di 0.7, per il lago Neusiedl è risultata di 0.8, tutti valori statisticamente significativi.

Gli algoritmi applicati alla serie storica 2004-2010 hanno permesso di evidenziare le diversità tra i quattro laghi e l'andamento nel tempo dei parametri. In figura 6 si riportano i valori medi della serie storica dei quattro parametri analizzati nei quattro laghi. Il lago di Garda conferma le sue caratteristiche oligotrofiche, il lago Neusiedl meso-eutrofiche, il lago Charzykowskie eutrofiche, mentre il lago Balaton risulta estremamente diversificato tra la zona ad ovest, che si presenta con caratteristiche eutrofiche, e la zona est che risulta, invece, mesotrofica.

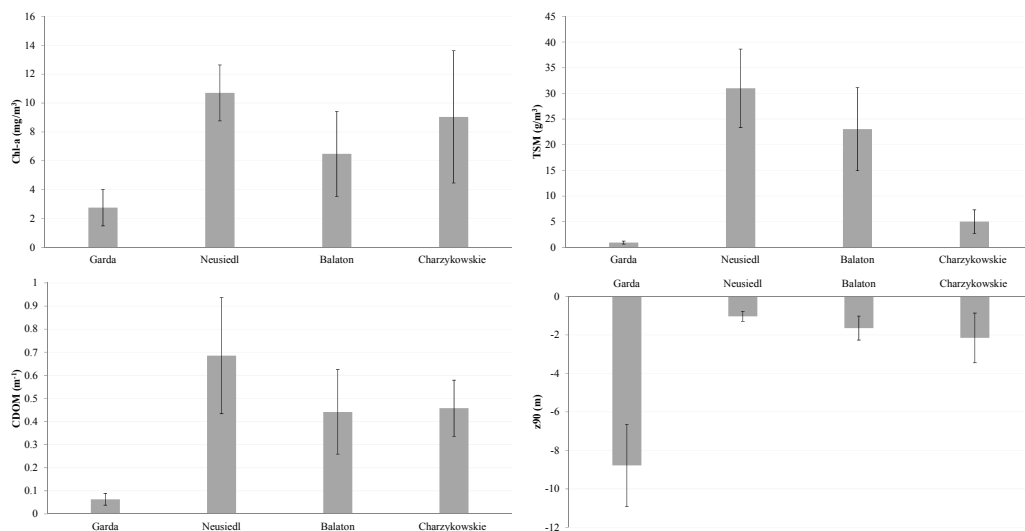


Figura 6 – Confronto dei valori medi di chl-a, TSM, CDOM e z90 per il periodo 2004-2010.

L'analisi spaziale dei dati ha evidenziato come il lago di Garda e il lago Neusiedl presentino piccole differenze tra le differenti zone del lago, mentre il lago Balaton presenta grande diversità nelle concentrazioni di chl-a e TSM tra la porzione est e ovest del lago (Figura 7a). Il lago Charzykowskie presenta elevate differenze tra la porzione a nord e quella a sud del lago (Figura 7b).

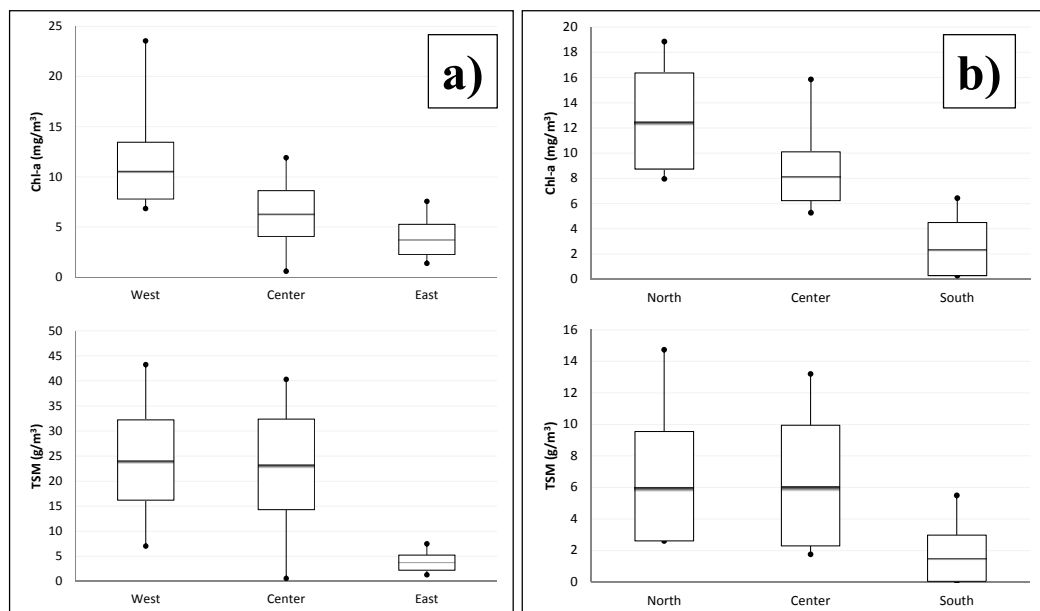


Figura 7 – Confronto tra i valori di concentrazione di chl-a e TSM in differenti regioni di dimensioni di 3x3 pixel, il valore medio è inserito nel box plot della deviazione standard, con indicati i valori di massimo e minimo. In a i dati relativi al lago Balaton, in b) quelli relativi al lago Charzykowskie.

In figura 8 si mostrano i valori della temperatura superficiale delle acque. Il lago di Garda si è rivelato come il lago con le fluttuazioni della temperatura superficiale meno marcata e con valori medi stabili lungo l'intervallo di tempo 2004-2007. Il lago Charzykowskie è risultato il lago con il range di temperatura più elevato, con valori massimi giornalieri che raggiungono i 30 °C (21 luglio 2010), mentre i valori medi annui e totali risultano inferiori rispetto ai laghi Neusiedl e Balaton (con caratteristiche batimetriche paragonabili), a causa della stagione invernale durante la quale il lago ghiaccia completamente.

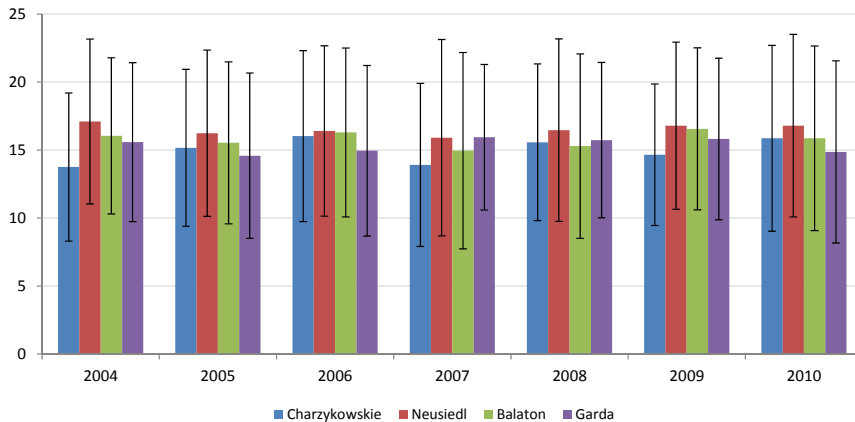


Figura 8 – Temperature medie annuali delle stazioni di centro lago nei quattro laghi del progetto EULAKES.

Conclusioni

I risultati ottenuti hanno evidenziato come il sensore MERIS sia idoneo per il monitoraggio della qualità delle acque dei laghi. Le attività svolte hanno evidenziato l'importanza di effettuare campagne di misure radiometriche e limnologiche per calibrare gli algoritmi da applicare alle immagini e validare i prodotti ottenuti sia a livello di correzione atmosferica sia di stima dei parametri di qualità. I risultati ottenuti hanno evidenziato una certa stabilità delle caratteristiche dei quattro laghi nel tempo, dalla quale si può dedurre come i cambiamenti climatici non abbiano provocato macroscopiche variazioni nella qualità delle acque.

Bisogna comunque precisare che la serie storica è troppo breve per poter comprendere effettivamente se sono in corso dei cambiamenti nella qualità delle acque dei laghi.

Il lago Balaton presenta problematiche di eutrofizzazione nella porzione ad ovest del lago e anche il lago Charzykowskie risente di problemi legati alle fioriture di cianobatteri. Il lago Neusiedl, invece, presenta acque molto torbide con elevate concentrazioni di sostanze organiche disciolte.

Le attività condotte nell'ambito del Progetto EULAKES hanno, comunque, rivelato alcune problematiche. La correzione atmosferica in alcune situazioni risulta un'operazione ancora complessa a cui si associano anche problemi dovuti agli effetti di adiacenza.

Infine, l'utilizzo del sensore MERIS per il monitoraggio della qualità delle acque interne del nord Europa (lago Charzykowskie) è risultata ostacolata dalla copertura nuvolosa che non ha permesso di coprire in modo adeguato tutte le differenti stagionalità.

Ringraziamenti

Grazie al FESR per la sponsorizzazione a livello europeo del Progetto EULAKES Ref. Nr. 2CE243P3.

Un grande ringraziamento a tutti i partner del Progetto EULAKES in particolare a N. Gallinaro e F. Sacchini della Comunità del Garda, B. Zennaro dell'APPA Trento per le attività organizzative e G.

Soja dell'Austrian Institute of Technology e T. Zechmeister dell'Austrian League of Nature Conservation Burgenland, A. Lenhoffer del Lake Balaton Development Coordination Agency, B. Nowicka, M. Glińska e A. Nadolna dell'Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute per il supporto nelle attività di campagna.

Un grande ringraziamento all'EOHelpdesk dell'ESA per il supporto. Per la campagna di misura in Polonia si ringrazia F. Nutini del CNR-IREA. Un particolare ringraziamento a D. Odermatt dell'Università di Zürich per la collaborazione nello studio dei laghi sub-alpini e C. Defrancesco dell'APPA-Trento, M. Bartoli e E. Soana dell'Università di Parma per le attività di laboratorio e i consigli limnologici.

Riferimenti bibliografici

- Alberotanza L, Barbaro J, Braga F, Pignatti S, Salviato S, Santini F. (2006), "Classificazione della vegetazione sommersa della Laguna di Venezia usando dati iperspettrali da aereo e da satellite", Atti convegno Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo, Sassari.
- Albert A, Peter G. (2006), "Inversion of irradiance and remote sensing reflectance in shallow water between 400 and 800 nm for calculations of water and bottom properties", *Applied Optics*, 45: 2331-2343.
- Bresciani M, Giardino C, Longhi D, Pinardi M, Bartoli M, Vascellari M. (2009), "Imaging spectrometry of productive inland waters. Application to the lakes of Mantua", *Italian Journal of Remote Sensing*, 41: 147-156.
- Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, Morabito G, Giardino C. (2011a), "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.
- Bresciani M, Giardino C, Bartoli M, Tavernini S, Bolpagni R, Nizzoli D. (2011b), "Recognising harmful algal bloom based on remote sensing reflectance band ratio", *Journal of Applied Remote Sensing*, 5 [DOI: 10.1117/1.3630218].
- Bresciani M, Giardino C, Boschetti L. (2011c), "Multi-temporal assessment of bio-physical parameters in lakes Garda and Trasimeno from MODIS and MERIS", *Italian Journal of Remote Sensing*, 43 (3): In press.
- Dekker AG, Vos RJ, Peters SWM. (2001), "Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes", *Science of the Total Environment*, 268: 197-214.
- Dekker AG, Vos RJ, Peters SWM. (2002), "Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data", *International Journal of Remote Sensing*, 23: 15-35.
- Doerffer R, Schiller H. (2008), "MERIS LakeWater Algorithm for BEAM ATBD, vol. 1.0", May 2008.
- Fomferra N, Brockmann C. (2006), "The BEAM project web page [Internet]. Carsten Brockmann Consult, Hamburg, Germany", Available from: <http://www.brockmann-consult.de/beam/>.
- George DG, Malthus TJ. (2001), "Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales", *Science of the Total Environment*, 268: 215-226.
- Giardino C, Candiani G, Zilioli E. (2005), "Detecting chlorophyll-a in Lake Garda (Italy) using TOA MERIS radiances", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71: 1045-1052.
- Giardino C, Brando VE, Dekker AG, Strömbeck N, Candiani G. (2007a), "Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion", *Remote Sensing of Environment*, 109 (2): 183-195.
- Giardino C, Bartoli M, Candiani G, Bresciani M, Pellegrini L. (2007b), "Recent changes in macrophyte colonisation patterns: an imaging spectrometry-based evaluation of southern Lake Garda (northern Italy)", *Journal of Applied Remote Sensing*, 1: 011509.
- Giardino C, Bresciani M, Villa P, Martinelli A. (2010a), "Application of remote sensing in water resource management: the case study of Lake Trasimeno, Italy", *Water Resource Management*, 24: 3885-3899.

- Giardino C, Bresciani M, Pilkaityte R, Bartoli M, Razinkovas A. (2010b), "In situ measurements and satellite remote sensing of case 2 waters: first results from the Curonian Lagoon" *Oceanologia*, 52(2), pp. 197-210
- Guanter L, Ruiz-Verdú A, Odermatt D, Giardino C, Simis S, Estellès V, Heege T, Dominguez-Gómez JA, Moreno J. (2010), "Atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over inland waters: Validation for European lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114 (3): 467-480.
- Hunter PD, Tyler AN, Gilvear DJ, Willby NJ. (2009), "Using remote sensing to aid the assessment of human health risks from blooms of potentially-toxic cyanobacteria", *Environmental Science and Technology*, 43: 2627-2633.
- Hunter PD, Tyler AN, Carvalho L, Codd GA, Maberly SC. (2010a), "Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114: 2705-2718.
- Hunter PD, Willby NJ, Tyler AN, Gilvear DJ, Kelly A, (2010b), "Mapping macrophytic vegetation in shallow lakes using the Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)", *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20: 717-727.
- Keller PA. (2001), "Comparison of two inversion techniques of a semi-analytical model for the determination of lake water constituents using imaging spectrometry data", *Science of the Total Environment*, 268: 189-196.
- Koponen S, Kallio K, Pulliainen J, Vepsäläinen J, Pyhälähti T, Hallikainen M. (2004), "Water Quality Classification of Lakes Using 250-m MODIS Data", *IEEE Geoscience and remote sensing letters* 1: 287-291
- Kutser T, Pierson D, Tranvik L, Reinart A, Sobek S, Kallio K. (2005), "Estimating the colored dissolved organic matter absorption coefficient in lakes using satellite remote sensing", *Ecosystems* 8: 709-720.
- Lella S, Bresciani M, Giardino C, L'Astorina A. (2011), "A Web Service-Based Tool to Disseminate Satellite-derived Water Quality Maps of Lake Garda". Proceedings of the International Conference: Data flow from Space to Earth: applications and interoperability, Venezia, Italy, 21-23 March 2011 (ISBN 9788889405154).
- Odermatt D, Heege T, Nieke J, Kneubuhler M, Itten K. (2008), "Water quality monitoring for lake Constance with a physically based algorithm for MERIS data", *Sensors*, 8: 4582-4599.
- Odermatt D, Giardino C, Heege T. (2010), "Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114, N. 3, 607-617.
- Paavel B, Arst H, Herlevi A. (2007), "Dependence of spectral distribution of inherent optical properties of lake waters on the concentrations of different water constituents", *Nordic Hydrology*, 38: 265-285.
- Reinart A, Reinhold M. (2008), "Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data", *Remote Sensing of Environment*. 112: 603-611.
- Simis SGH, Ruiz-Verdú A, Domínguez-Gómez JA, Peña-Martínez R, Peters SWM, Gons HJ. (2007), "Influence of phytoplankton pigment composition on remote sensing of cyanobacterial biomass", *Remote Sensing of Environment*, 106: 414-427.
- Strömbeck N, Pierson E. (2001), "The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwater", *Science of the Total Environment*, 268, 123-137.
- Van Mol B, Ruddick K. (2005), "Total Suspended Matter maps from CHRIS imagery of a small inland water body in Oostende (Belgium)", Proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21-23 March, ESRIN, Frascati, Italy, (ESA SP-593, June 2005).
- Vermote EF, Tanrè D, Deizè JL, Herman M, Morcrette JJ. (1997), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview", *Trans. on Geo. and Remote Sens.*, 35: 675-686.
- Voutilainen A, Pyhälähti T, Kallio KY, Pulliainen J, Kaipio JP. (2007), "A Filtering Approach for Estimating Lake Water Quality from Remote Sensing data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9: 50-64.