

Tecniche di Telerilevamento per la valutazione degli effetti delle deposizioni di *dust* sahariano nel lago di Garda - RIASSUNTO

Diversi studi negli ultimi decenni sono stati volti a dimostrare la relazione esistente fra qualità dell'aria e qualità dell'acqua, dovuta ai processi di scambio fra i due comparti che coinvolgono sostanze alla forma sia gassosa, che solida che liquida. Negli ultimi decenni, si è accertata l'importanza e si sono valutati gli effetti dell'apporto atmosferico, soprattutto per acque oligotrofiche, degli elementi presenti negli aerosol sia di origine antropica che di origine naturale, in particolare del *dust* (aerosol che ha origine per sollevamento eolico di materiale desertico). Diversi studi hanno infatti accertato per le acque mediterranee ed oceaniche che quest'ultimo, ricco di silicio, alluminio, ferro e potassio, ma anche di fosforo e azoto, apporta una quantità non trascurabile, in acque oligotrofiche, di nutrienti e metalli, utili alla crescita del fitoplancton, causando fioriture algali.

Scopo di questa tesi, che si inserisce nell'ambito del progetto SINOPIAE, è stata la valutazione degli effetti della deposizione di aerosol di origine desertica sulla qualità delle acque del lago di Garda, il più esteso in Italia, caratterizzato proprio da acque oligotrofiche utilizzate sia a scopo potabile che turistico, energetico, industriale ed irriguo, attraverso l'uso di immagini satellitari e misure *in situ*. In particolare si sono utilizzate 70 immagini satellitari dello spettroradiometro MERIS attraverso cui si sono stimati i parametri di qualità delle acque eventualmente influenzati dalle deposizioni: la concentrazione di clorofilla-a (chl-a), variabile *proxy* dell'abbondanza di fitoplancton e la trasparenza della colonna d'acqua. La risoluzione temporale e la possibilità di una visione sinottica dell'area in esame, date dall'uso delle immagini satellitari, permettono di ottenere dati frequenti, su larga scala e a basso costo, facendo quindi del telerilevamento un ottimo metodo di integrazione delle analisi limnologiche. Per questo motivo si sono innanzitutto validati e confrontati due diversi metodi di processamento delle immagini (per la correzione dei disturbi radiometrici e atmosferici e la stima dei parametri) da utilizzare per realizzare un unico dataset di prodotti di parametri di qualità delle acque per i periodi di interesse per il progetto SINOPIAE (estate 2005 e intero 2007).

Entrambe le catene di processamento prevedono come elaborazione preliminare la correzione dell'effetto *Smile* (tipico del sensore MERIS), ovvero piccole variazioni della lunghezza d'onda di ogni pixel lungo l'immagine, dovute al fatto che le misurazioni di ogni pixel lungo una linea dell'immagine vengono fatte da un set di sensori CCD. La correzione (il cui modello è stato implementato in seguito a campagne di calibrazione del sensore) può essere eseguita attraverso il toolbox del software BEAM-VISAT.

Inoltre si è effettuata la correzione dell'effetto di adiacenza, disturbo dovuto alla radianza riflessa dalle zone costiere che viene deviata entro l'IFOV del sensore, soprattutto nelle bande NIR: l'effetto è dovuto al forte contrasto fra i pixel d'acqua, praticamente nera nelle bande del rosso e dell'IR, e le aree vegetate, in cui invece si ha un'alta riflettanza nelle medesime bande. La correzione è stata effettuata attraverso l'uso dello strumento ICOL, anch'esso facente parte della collezione BEAM-VISAT.

Il primo dei due metodi di processamento dei dati prevede l'uso della rete neurale Case-2-Regional (C2R), sempre contenuta in BEAM-VISAT, la quale permette la stima dei valori di riflettanza per ognuna delle 15 bande MERIS, di spessore ottico dell'aerosol (AOT), di concentrazione di chl-a e di trasparenza, oltre a numerosi altri parametri non di interesse per questa tesi. La rete neurale effettua sia la correzione atmosferica dell'immagine sia la stima dei parametri, senza l'inserimento di alcuna informazione aggiuntiva.

Il secondo metodo invece prevede in sequenza l'uso del codice di trasferimento radiativo 6SV che permette la correzione atmosferica dell'immagine a partire da una serie di informazioni fornite in input, descrittive della geometria di ripresa e delle condizioni atmosferiche, attraverso la definizione di un modello di aerosol (ad hoc per l'area in esame, come nel caso di questa tesi, o scelto fra i modelli di default) e delle condizioni di visibilità (attraverso il valore di AOT a 550 nm). Per quest'ultima, si è stimato il valore di AOT al di sopra dell'area del lago attraverso l'interpolazione spaziale e temporale dei dati della rete AERONET, raccolti presso Ispra, Venezia e Modena e pesati con l'inverso del quadrato della distanza dal centro lago. Questa scelta è stata effettuata dopo il confronto dei dati di riflettanza misurati *in situ* e disponibili per alcune date, con quelli ottenuti usando sia i dati AERONET (presi singolarmente, insieme o a coppie) che le stime di AOT ottenute attraverso il C2R: il confronto ha evidenziato migliori risultati attraverso l'uso dei dati AERONET ma avendo ottenuto valori del coefficiente di correlazione molto simile per le diverse combinazioni, si è scelto di utilizzare, nella maggior parte dei casi, la media pesata di tutte le stazioni AERONET, dato idealmente più robusto alla presenza di errori di misura rispetto a quello relativo ad una singola stazione, copertura nuvolosa permettendo.

In seguito alla correzione atmosferica si è applicata la correzione dell'effetto della riflessione speculare, attraverso l'uso di un algoritmo dedicato.

La catena di processamento è rappresentata nel diagramma di flusso in Figura 1.

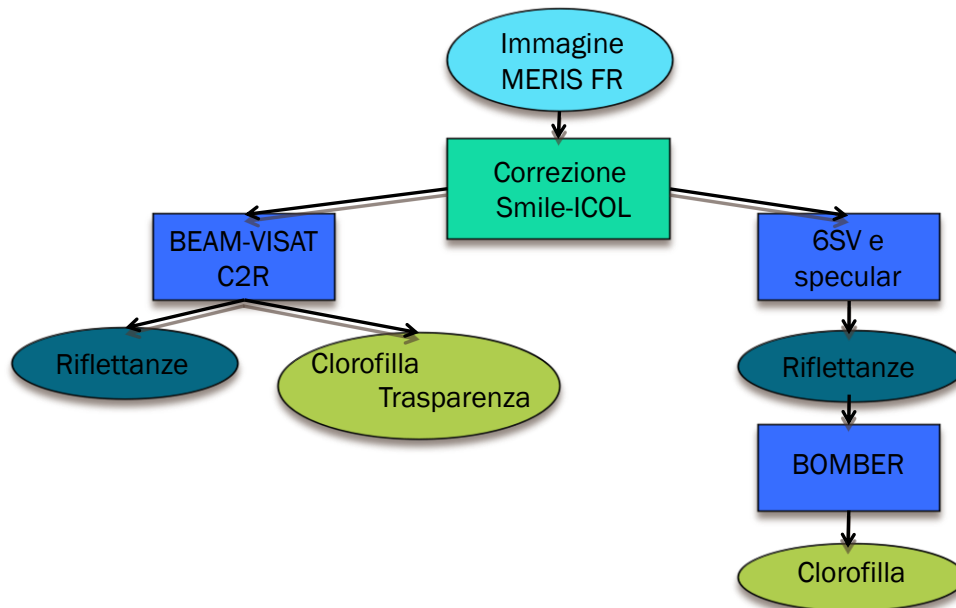


Figura 1: catena di processamento delle immagini MERIS Full Resolution secondo i due diversi metodi utilizzati.

I valori di riflettanza così ottenuti sono stati utilizzati per ricavare le stime di concentrazione di chl-a attraverso l'uso del modello di inversione bio-ottica BOMBER (*Bio-Optical Model Based tool for Estimating water quality and bottom properties from Remote sensing images*), che permette di ricavare i parametri di qualità a partire dalle riflettanze e dalle proprietà ottiche sito specifiche, già calibrate per il lago di Garda.

Una volta ottenuti i prodotti di concentrazione di chl-a e di trasparenza, sono stati georeferenziati nel sistema UTM-WGS84, zona 32.

Per la validazione dei prodotti finali, si sono confrontati i valori di concentrazione di chl-a stimati, con misure *in situ* sincrone alle immagini nelle stazioni del CRA di Sirmione e di APPA Trento. Il modello BOMBER in alcuni casi sottostima la concentrazione di chl-a, ma nel complesso si ottengono buoni risultati attraverso l'uso sia di questo che del C2R (il coefficiente di regressione calcolato e l'RMSE sono pari rispettivamente a 0.84 e 0.53 mg/m³ per il C2R, 0.80 e 0.65 mg/m³ per il BOMBER).

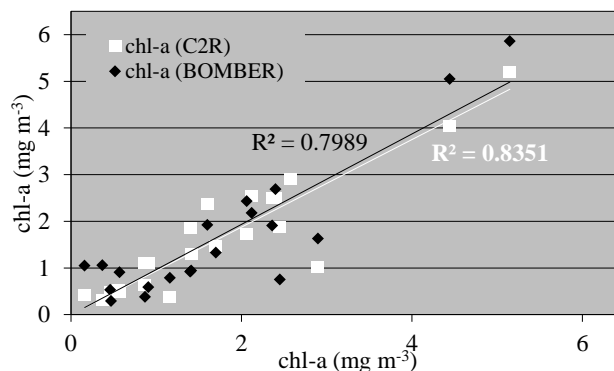


Grafico 1: scatterogramma dei valori di concentrazione di chl-a stimati da C2R e BOMBER (sull'asse delle ordinate) e misurati in situ (sull'asse delle ascisse).

Il dataset è stato quindi innanzitutto utilizzato per stimare l'andamento dei due parametri nei due periodi, in quattro macroaree rappresentative del lago.

L'analisi dell'andamento (Figura 2) ha permesso di confermare la condizione meso-oligotrofica del lago per i due periodi considerati, con i valori medi di chl-a per l'intero lago compresi fra 0.5 e 8 mg/m³, e di trasparenza compresi fra -16 e -4 metri.

L'analisi ha permesso inoltre di evidenziare la diversità fra la parte settentrionale rispetto alle aree centrali e meridionali del lago: la parte più settentrionale presenta una morfologia diversa ed è influenzata da altri fattori, prima fra tutti la presenza dell'immissario Sarca. Nelle restanti aree la concentrazione di chl-a presenta un andamento molto simile.

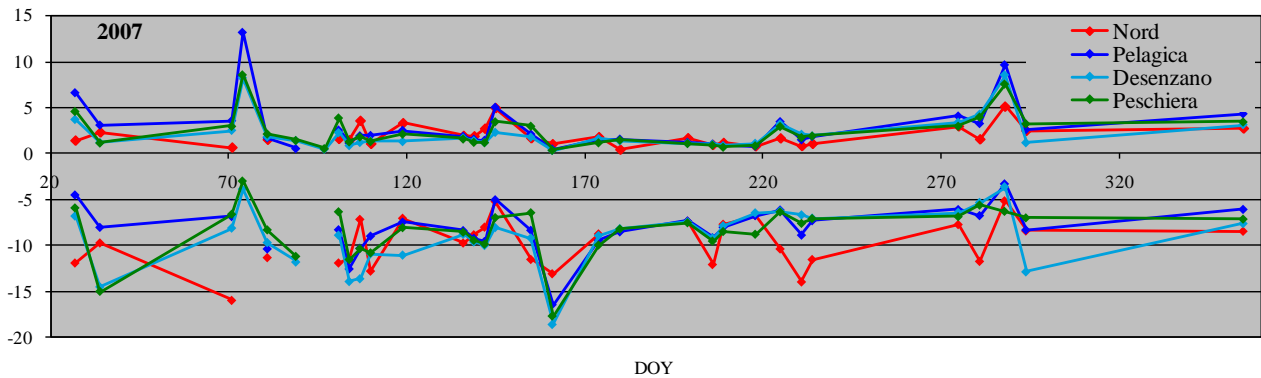
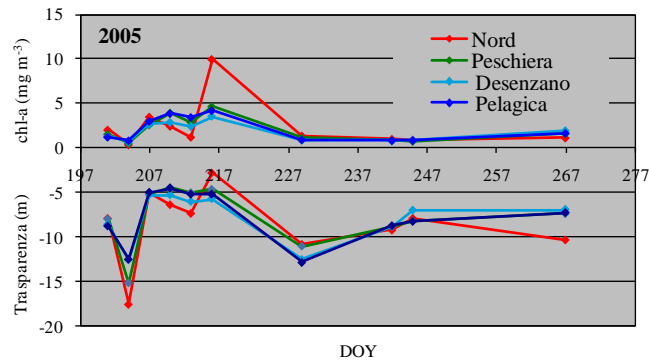


Figura 2: andamento della concentrazione di chl-a e della trasparenza medie distinte per le 4 macroaree per i periodi scelti per il progetto SINOPIAE (in alto l'estate 2005, in basso il 2007).

Nella seconda parte della tesi si sono utilizzate solo le immagini disponibili in corrispondenza delle finestre temporali a cavallo dei fenomeni di deposizione di *dust*.

Per valutarne l'effetto, sono stati individuati degli eventi significativi di deposizione di *dust* sull'area di interesse estendendo la ricerca anche ad anni diversi da quelli scelti nell'ambito del progetto SINOPIAE: la ricerca è stata effettuata attraverso l'uso combinato di immagini satellitari SEVIRI, delle previsioni del modello del BSC di Barcellona del carico di *dust* e delle misure *in situ* dei valori di AOT e del parametro Angstrom α raccolti dai fotometri della rete AERONET, oltre alle concentrazioni di PM raccolte dalle centraline ARPA. Date le caratteristiche degli aerosol di origine desertica, che sono composti da particelle appartenenti alla frazione grossolana, AOT e α sono utili a individuare il passaggio di *dust* sull'area di interesse: valori alti del primo (oltre la soglia di anomalia calcolata sulle serie mensili di dati) indicano infatti un'alta concentrazione di aerosol, valori del secondo prossimi allo 0 indicano che l'aerosol è composto da particelle grossolane e quindi di origine desertica. I prodotti SEVIRI e BSC sono stati usati per accertare il passaggio dell'aerosol. Le concentrazioni di PM sono state infine utilizzate per individuare l'effettiva deposizione al suolo del materiale.

Nella finestra temporale relativa a ciascun evento individuato si è quindi valutato l'andamento dei parametri in una zona pelagica del lago, il meno possibile influenzata dalle coste, al largo di San Felice del Benaco (nel rettangolo rosso in Figura 3).

Data la complessità delle dinamiche della crescita della comunità fitoplanctonica si è inoltre valutato l'andamento di altri fattori che potenzialmente possono influenzare sia l'effetto della deposizione sia l'andamento della concentrazione di chl-a in generale:

- innanzitutto la presenza di precipitazioni in corrispondenza o successive al passaggio del *dust*, che ne favorisce la deposizione per via umida o il *run-off* del materiale depositato lungo le coste. La presenza di precipitazioni è stata indagata attraverso i dati delle stazioni ARPA;
- l'andamento della temperatura superficiale (LST) a cui l'abbondanza di fitoplancton è positivamente correlata, indagato attraverso le misure *in situ* raccolte dal CRA di Sirmione;
- la presenza o meno di fenomeni di circolazione dell'intera colonna d'acqua (che per il Garda non avviene tutti gli anni) che permette la risalita in superficie dal fondale dei nutrienti utili alla crescita del fitoplancton.

Gli eventi individuati e analizzati sono stati in tutto quattro: 23-26 marzo 2005, 28 luglio 2005, 5-9 ottobre 2007, 28 maggio 2008.

A seguito di ciascun evento, si è stimato un aumento della concentrazione di chl-a, compreso tra 17% e 125% rispetto alla concentrazione stimata in corrispondenza delle date precedenti l'evento. L'aumento si è registrato 7-10 giorni dopo il passaggio dell'aerosol.

La variabilità degli effetti è dovuta innanzitutto all'intensità dell'evento di deposizione ma anche alla complessità dell'ecosistema in cui operano diversi fattori, fra i quali quelli già citati.

Per quanto riguarda la valutazione di questi fattori, per tutti i quattro casi si sono registrati eventi di precipitazione, mentre la temperatura ha avuto un andamento decrescente per gli eventi di luglio 2005 e ottobre 2007, crescente per gli altri due per i quali non si può dunque escludere l'influenza concorrente della temperatura sull'aumento di chl-a.

Nella Figura 3 sono riportati i risultati ottenuti per due dei quattro casi (luglio 2005 e ottobre 2007). Come si può notare il picco di concentrazione di chl-a viene registrato fra i 7 e i 10 giorni successivi alla deposizione.

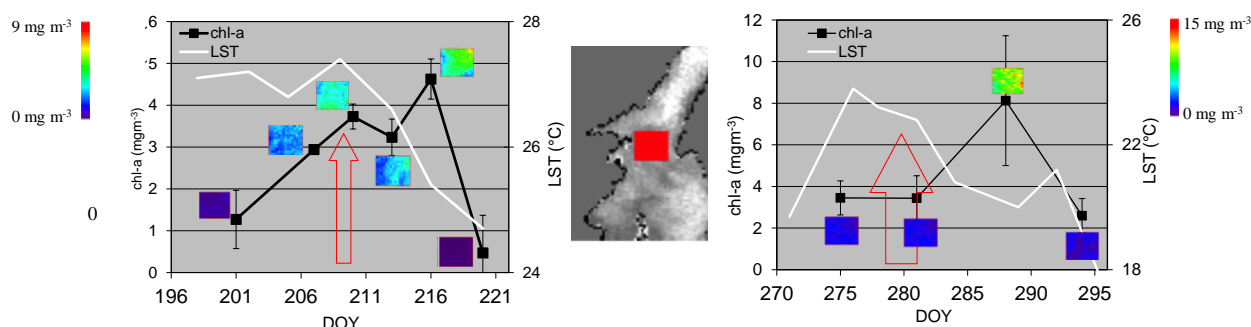


Figura 3: gli effetti di due deposizioni di dust sulla concentrazione (in nero): a sinistra quella del 28 luglio 2005 (DOY: 209), a destra quella del 5-9 ottobre 2007 (DOY: 278-282). In bianco è invece riportato l'andamento della LST; la freccia rossa indica la data del passaggio di dust. Ai grafici sono state sovrapposte le mappe di chl-a per l'area evidenziata in rosso nella figura centrale, ottenute dalle immagini MERIS disponibili.

La valutazione di questo intervallo temporale è però influenzata dalla disponibilità delle immagini satellitari, condizionata oltre che dai tempi di rivisitazione del sensore (2-3 giorni per l'area di interesse) anche dalla copertura nuvolosa.

Fra le prospettive future vi è però la possibilità di riutilizzare questa catena di processamento dei dati per le immagini prodotte dai satelliti di nuova generazione SENTINEL (il cui lancio è previsto per il biennio 2014-2015), che permetteranno di analizzare dati di ulteriori nuovi eventi con una più elevata risoluzione temporale e con risoluzione spettrale simile a quella di MERIS, ma con un maggiore numero di bande (SENTINEL-3) e con una maggiore risoluzione spaziale (SENTINEL-2).

Inoltre l'installazione di un fotometro solare (CIMEL) nei pressi della penisola di Sirmione, prevista all'interno del progetto SINOPIAE, permetterà di ottenere i valori dei parametri descrittivi degli aerosol (AOT e α) direttamente nei pressi del lago.

L'analisi più approfondita degli ulteriori fattori influenzanti la comunità fitoplanctonica e di ulteriori eventi, costituirà infine la base della creazione di un albero decisionale, attraverso l'assegnazione di pesi e di soglie a ciascuno dei parametri considerati, utile a individuare e descrivere tutti i casi di interazione fra qualità dell'aria e dell'acqua (non solo nel caso di deposizioni di dust sahariano ma anche di altri tipi di aerosol, per esempio di origine antropica). In Figura 4 è riportato lo schema a blocchi contenente i parametri che verranno presi in considerazione nella creazione dell'albero.

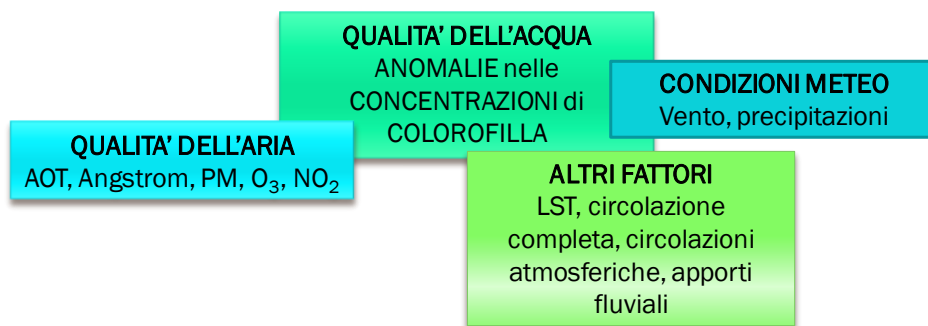


Figura 4: diagramma a blocchi contenente alcuni dei parametri utilizzabili per la costruzione di un albero decisionale.