

UTILIZZO DI TECNOLOGIE GIS E TELERILEVAMENTO PER UNA STIMA DELLA CONCENTRAZIONE DI CLOROFILLA NEL GOLFO DI TRIESTE: NUOVE COMPARAZIONI FRA DATI ANALITICI E INFORMAZIONI RICAVATE DAL SATELLITE

Andrea Favretto (*), **Giovanni Mauro (**)**, **Cinzia De Vittor (***)**,
Pierluigi Barbieri (*)

(*) Università degli Studi di Trieste.

(**) CETA (Centro Ecologia Teorica ed Applicata), Gorizia.

(***) Laboratorio di Biologia Marina di Trieste.

Il presente lavoro è stato realizzato in piena collaborazione fra gli Autori, tuttavia a fini concorsuali si precisa che a Giovanni Mauro si deve l'elaborazione dei dati satellitari, a Cinzia De Vittor la parte relativa ai dati sulla clorofilla a rilevati nel Golfo di Trieste, a Pierluigi Barbieri l'analisi statistica dei dati, il resto del lavoro ad Andrea Favretto.

Introduzione

Il presente lavoro costituisce lo sviluppo di un precedente studio¹ nel quale, tramite l'integrazione di analisi tradizionali con tecniche di telerilevamento, si è cercato di costruire un semplice modello lineare utile a superare i limiti spaziali imposti dal monitoraggio puntuale nella determinazione della concentrazione di clorofilla *a* in ambito marino costiero. I risultati ottenuti hanno evidenziato la potenzialità di questa metodolo-

gia, che viene ampiamente utilizzata in ambienti marini ed oceanici (e.g.: Asmat et al., 2003), oltre che fluviali (e.g.: Ritchie e Cooper, 2001) e lacustri (Baruah et al., 2001; De Francesco et al., 2003).

La determinazione della concentrazione di clorofilla *a*, che rappresenta il pigmento prevalente degli organismi fitoplanctonici, è una delle analisi maggiormente utilizzate nei programmi di ricerca e di monitoraggio per la stima indiretta della biomassa algale e della sua produttività².

¹ FAVRETTO A., DE VITTOR C., BARBIERI P., 2001. *Utilizzo di tecnologie Remote Sensing per una stima della concentrazione di clorofilla nel Golfo di Trieste: comparazione con dati analitici*, Atti della V Conferenza ASITA, Rimini, 9-12 Ottobre 2001, Vol.II, pp. 779-784.

² La clorofilla *a* costituisce un indicatore ecologico di provata affidabilità. La valutazione dello stato tro-

Nel precedente lavoro le concentrazioni di clorofilla *a*, ottenute per via analitica, sono state confrontate con la banda verde di un'immagine satellitare Landsat 7 rilevata nel Golfo di Trieste nello stesso periodo in cui venivano eseguiti i campionamenti puntuali (autunno 1999). Attraverso il calcolo della regressione lineare fra le due variabili (banda verde dell'immagine satellitare e clorofilla *a* campionata in loco), è stato ottenuto un coefficiente di correlazione *r* pari a 0.79 e, conseguentemente, è stata stimata la concentrazione della clorofilla *a* nell'intero Golfo.

In questo lavoro sono state analizzate due immagini del sensore Aster (satellite Terra), relative al 3 settembre 2003. Per affinare i risultati conseguiti nel precedente studio, ai dati campionati in loco ed ai valori della banda verde del satellite sono stati affiancati i valori della banda termica del sensore; in questo modo, l'elaborazione è stata effettuata utilizzando tre variabili. È stato così possibile stimare un piano di regressione (anziché una retta), ed ottenere un valore del coefficiente *r* leggermente più alto rispetto a quello calcolato nell'elaborazione eseguita su due sole variabili. Sulla base del piano di regressione così ottenuto, è stata stimata la distribuzione spaziale della concentrazione di clorofilla *a* nelle acque superficiali dell'intero Golfo di Trieste.

Area studio

Il Golfo di Trieste, ubicato nella parte più settentrionale ed orientale del mare Adriatico, si estende da Punta Tagliamento a Punta Salvore. Il bacino, la cui area ha un'estensione di circa 600 km² per un volume d'acqua di 9,6 km³, è contornato dalle coste della penisola istriana, dall'altopiano carsico e dalle coste connesse alla piana alluvionale veneto-friulana (Rossi et al., 1968).

Il fondale, con profondità decrescente in direzione sudnord, è fortemente influenzato dagli apporti sedimentari: nella parte orientale scende rapidamente fino alla profondità di 20 m, mentre ad ovest, per la presenza dei sedimenti isontini, la pendenza è più dolce (circa 3 m/km) fino a raggiungere 1112 m (Brambati e Catani, 1988). La profondità media è di circa 17 metri, con un massimo di 25 nell'area centro-orientale. L'area occidentale è caratterizzata da spiagge sabbiose che si estendono tra la laguna di Grado e Marano e la baia di Panzano. Le coste istriane presentano, invece, la caratteristica struttura rocciosa a falesia sul mare che si trova anche lungo la strada costiera fino a Duino (Fig. 1). Avvicinandosi a Trieste il litorale si presenta profondamente modificato dall'azione antropica con terrapieni, moli, dighe foranee, ecc.

Il più importante apporto d'acqua dolce deriva dal fiume Isonzo, che ha una portata media annuale pari a circa 150

fico di un ambiente costiero, caratterizzato da ampie variazioni spazio-temporali, richiede però l'esecuzione di campionamenti frequenti su un ampio reticolo di stazioni. Le immagini satellitari, offrendo una stima della concentrazione di clorofilla su aree estese, possono risultare utili per lo studio della distribuzione della biomassa fitoplanctonica, soprattutto se validate da una calibrazione specifica.

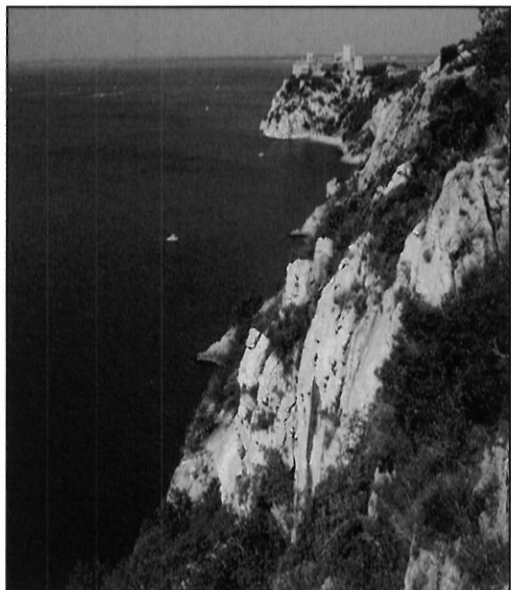


FIGURA 1 – *Le falesie e il castello di Duino (TS) viste da un punto panoramico della costiera triestina (fonte: www.regione.fvg.it).*

m^3s^{-1} (Olivotti et al., 1986). Gli apporti fluviali sono continui, ma con rilevanti aumenti in occasione delle piene. La zona più settentrionale del Golfo è influenzata dagli apporti del fiume Isonzo, che presenta un regime di tipo alpino con due massimi di portata, superiori a $1500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, in giugno ed in novembre (Naudin et al., 1996) e, in misura assai minore, da quelli del fiume Timavo, caratterizzato da un regime carsico e quindi in grado di

trasportare alla foce sedimenti quasi esclusivamente fini, che vengono dispersi in una ristretta zona a ridosso della costiera tra Monfalcone e Duino. In occasione delle piene risulta particolarmente evidente il trasporto di sedimenti in sospensione da parte del fiume Isonzo che provoca un sensibile intorbidamento delle acque marine in tutta la parte settentrionale del Golfo.

Per quanto riguarda il campo dinamico, misure e modelli evidenziano come le acque superficiali (05 m), molto influenzate dall'azione del vento, siano interessate ad una circolazione oraria in presenza di venti occidentali. Tale andamento tende ad invertirsi per venti orientali ed in particolare in occasione di eventi di bora (Mosetti, 1972). In questo caso la circolazione assume una struttura omogenea, cioè il campo delle correnti e della densità non cambia con la profondità. In generale, al di sotto dello strato superficiale si osserva un'inversione del campo di corrente che presenta una circolazione contraria (ciclonica) caratterizzata da forte stabilità.

Fonte dei dati

Immagini satellitari: due immagini, atmosfericamente corrette³, registrate dal sensore Aster⁴ datate 3 settembre 2003. È

³ Le immagini satellitari utilizzate erano state corrette atmosfericamente da EOS Data Center. La correzione atmosferica permette la riduzione parziale del disturbo determinato dalle radiazioni registrate dal sensore senza aver raggiunto la superficie terrestre, ma riflesse dall'atmosfera (Lillesand e Kiefer, 1999).

⁴ Il satellite Terra è stata lanciato nel dicembre 1999 dalla NASA nell'ambito del progetto EOS (*Earth Observing System*). L'orbita è quasi polare ad un'altezza di 705 km, eliosincrona ossia con un attraversamento sull'equatore alle 10:30 (ora locale). Passa sopra la stessa area ogni 16 giorni. Il sensore Aster, montato su

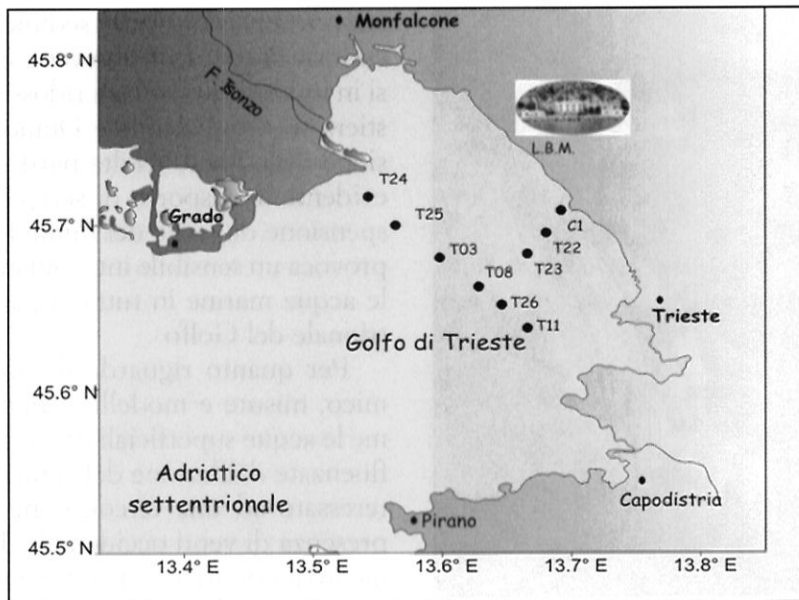


FIGURA 2 – Posizionamento delle stazioni di rilevamento della clorofilla *a*.

stata impiegata, inoltre, l'informazione relativa alla temperatura (T_s : temperatura da satellite) fornita da EOS Data Center che rende disponibili, a richiesta, layer con dati di temperatura calibrati sull'immagine satellitare.

Dati stazionali (Clorofilla a e Temperatura): valori di concentrazione della

clorofilla *a* (determinata per via spettrofluorimetrica⁵) e della temperatura (T_p : temperatura puntuale), registrati presso alcune stazioni di riferimento nel Golfo di Trieste. I dati si riferiscono a campioni prelevati alla quota superficiale, in un reticolo di 10 stazioni posizionate in modo da essere rappresentative per l'intero Golfo di Trieste (Fig. 2).

questo vettore, è il risultato della cooperazione tra la NASA ed il Ministero dell'Industria e degli Affari giapponese. Esso registra immagini della Terra ad alta risoluzione (pixel da 15 a 90 metri), in 14 diverse bande dello spettro elettromagnetico, dal visibile all'infrarosso termico. L'immagine telerilevata ricopre un'area quadrata di 60 km di lato. Il sensore Aster consiste di tre strumenti separati, ognuno operante in una differente regione spettrale. Questi sottosistemi sono i seguenti: VNIR (*Visible and Near Infrared Region*, ossia regioni del visibile e del vicino Infrarosso), SWIR (*Short Wave Infrared Region*, regione dell'infrarosso medio) e TIR (*Thermal Infrared Region*, regione dell'infrarosso termico) (Abrams e Hook, 2002). Nella comunità scientifica l'uso di dati ASTER rappresenta l'ultima frontiera per creare carte dettagliate della copertura del suolo, della temperatura della superficie, nonché ricostruzioni tridimensionali delle aree studiate.

⁵ L'analisi spettrofluorimetrica è stata condotta su estratto acetone utilizzando uno spettrofluorimetro PERKIN ELMER LS50B (Lorenzen e Jeffrey, 1980).

Metodologia

La metodologia adottata è stata la seguente:

1. *Selezione delle bande.* Le prime tre bande delle immagini satellitari, la verde, la rossa e la infrarossa vicina (sottoinsieme VNIR) ed il layer della temperatura sono stati compressi in un unico file composito (operazione cosiddetta di «stack di layer»). Poiché la risoluzione spaziale dei due sottoinsiemi è diversa (VNIR 15 metri; temperatura 90 metri), il layer della temperatura è stato riclassificato con una griglia di 15 metri.
2. *Mosaicatura delle immagini satellitari.* Poiché l'area studiata è coperta nel caso specifico da due immagini, queste sono state mosaicate in un'unica immagine dalla quale è stato ritagliato, successivamente, un riquadro che delimita l'area marina allo studio e le coste.
3. *Posizionamento delle stazioni di rilevamento.* Le stazioni di rilevamento puntuale sono state posizionate sull'immagine satellitare composita al fine di confrontare i dati relativi alla clorofilla campionati con i valori relativi alla banda verde del satellite ed alla temperatura. Il sistema di coordinate prescelto è Gauss Boaga fuso est.
4. *Rilevazione dei valori relativi la banda*

verde e la temperatura nell'immagine satellitare. Dopo il posizionamento delle singole stazioni è stata realizzata un'indagine puntuale dei valori della banda verde e della temperatura rilevati dall'immagine satellitare⁶. L'indagine ha ovviamente riguardato anche l'andamento dei pixel adiacenti, al fine di ampliare l'informazione spaziale.

5. *Regressione multipla (a tre dimensioni).* Una volta raccolti tutti i dati relativi alla temperatura (T_p), ai valori della banda verde ed ai valori di clorofilla a , si è proceduto ad una loro analisi statistica. A tale scopo è sembrato conveniente utilizzare una procedura di regressione multipla, in uno spazio tridimensionale che prendesse in esame tutte e tre le variabili considerate. In questo modo si è potuto estrapolare il modello che interpola meglio questi dati (secondo il metodo dei minimi quadrati) e che, nel caso specifico, trattandosi di un'interpolazione a tre dimensioni, permette di definire un piano di regressione (Vajani, 1980). Tale grafico è riportato in Fig. 3. Per comprendere il grado di affidabilità di tale modello è stato valutato il coefficiente di determinazione (R^2) (da cui si può facilmente derivare anche il coefficiente di correlazione r , da porre a confronto con il modello elaborato nel lavoro precedente).

⁶ Data la risoluzione spaziale del layer temperatura (90x90 metri per pixel), la variabilità della temperatura dall'immagine satellitare (T_s) evidenzia, ovviamente, una minore sensibilità per questa variabile rispetto ai dati raccolti presso le stazioni (T_p). Per questo è sembrato opportuno utilizzare questi ultimi dati per calibrare il modello (ovverosia per il calcolo dei parametri del piano di regressione). I dati relativi alla temperatura raccolta da satellite (T_s) vengono comunque utilizzati nel corso dell'implementazione del modello con l'immagine satellitare per la stima finale della concentrazione di clorofilla nel Golfo di Trieste.

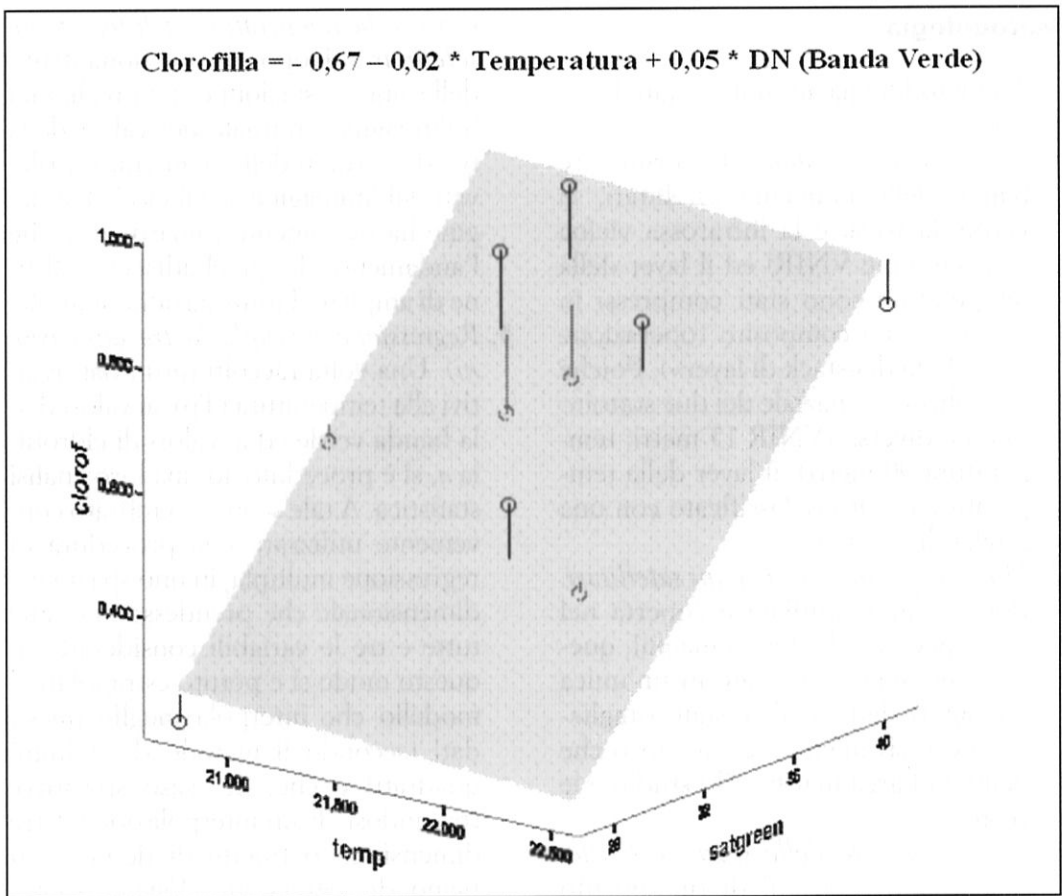


FIGURA 3 – Il piano di regressione definito dalle tre variabili, clorofilla a, valori digitali assunti dalla banda verde delle immagini satellitari Aster e temperatura.

6. *Implementazione del modello con i dati telerilevati.* L'informazione ottenuta dalle singole stazioni è di tipo puntuale. Per avere un'informazione areale si è proceduto ad implementare il modello, ottenuto mediante l'interpolazione a tre variabili, con i dati satellitari, ovvero sia utilizzando la temperatura dal satellite (T_s) e, naturalmente, i valori della banda verde.

Risultati

Il modello ottenuto tramite l'interpolazione delle variabili temperatura, valori digitali della banda verde e dati relativi alla clorofilla è il seguente:

$$\text{Clorofilla } a = - 0,67 - 0,02 * \text{Temperatura} + 0,05 * \text{DN (Banda verde)}$$

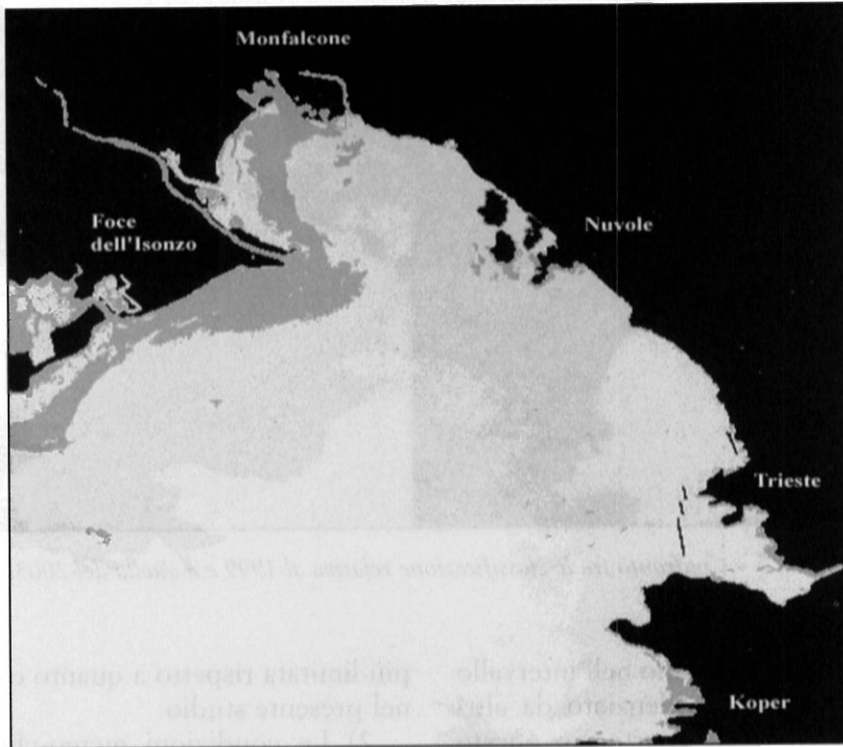


FIGURA 4 – *Classificazione delle acque del Golfo di Trieste in base alla concentrazione di clorofilla *a* (relativa al 3 settembre 2003).*

Il coefficiente di determinazione (R^2) assume un valore pari a 0.81, che permette di valutare, dunque, la clorofilla in funzione della temperatura e dei valori assunti dalla banda verde con un grado di incertezza minore del 20 per cento. Tuttavia, questo rilevante miglioramento rispetto ai risultati precedenti è da imputare principalmente al fatto che nel presente caso sono state adottate immagini atmosfericamente corrette. Infatti, la correlazione lineare tra valori digitali della banda verde e clorofilla evidenzia un coefficiente di

determinazione pari a 0.79 che viene solo leggermente migliorato con l'integrazione dei dati relativi alla temperatura.

Implementando questo modello nell'immagine satellitare composita (del quale sono stati utilizzati i layer della banda verde e della temperatura-Ts) si è ottenuta la «mappa della distribuzione della clorofilla *a* nel Golfo di Trieste» relativa al 3 settembre 2003 (Fig. 4). Sono state determinate 4 classi di concentrazione per la clorofilla *a*: $< 0.6 \text{ } \mu\text{g/l}$, $0.6 - 0.9 \text{ } \mu\text{g/l}$, $0.9 - 1.2 \text{ } \mu\text{g/l}$, > 1.2

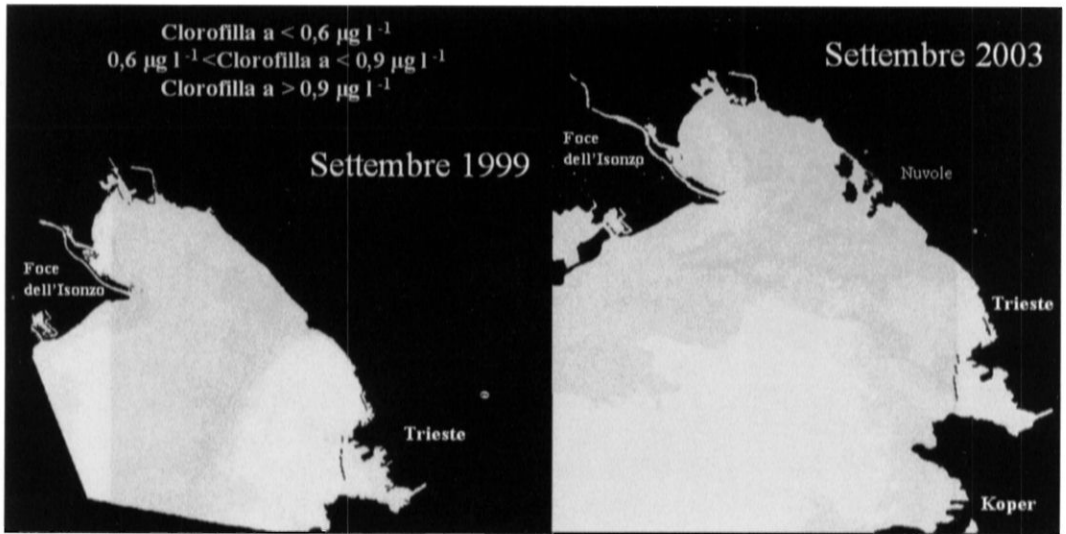


FIGURA 5 – Confronto tra la classificazione relativa al 1999 e a quella del 2003.

$\mu\text{g/l}$. Tali valori rientrano nell'intervallo di concentrazione evidenziato da altri autori nel Golfo di Trieste per questo periodo (Fonda Umani et al., 1998; De Vittor e De Prà 2003).

La distribuzione ottenuta permette alcune osservazioni:

1) Nel Golfo di Trieste, la struttura della comunità fitoplanctonica è fortemente influenzata dalle acque ricche in nutrienti provenienti soprattutto dal fiume Isonzo (Malej *et al.* 1995). Le concentrazioni di clorofilla *a* risultano più elevate, infatti, nell'area estuariare isontina e, sottocosta, in prossimità delle zone più fortemente antropizzate (Trieste e Capodistria). Va osservato che anche nel precedente lavoro i valori più alti di clorofilla erano stati rilevati in prossimità della foce dell'Isonzo (Fig. 5), ma l'area interessata da concentrazioni elevate era risultata decisamente

più limitata rispetto a quanto osservato nel presente studio.

2) Le condizioni meteo-climatiche (dati OSMER, Osservatorio Meteorologico Regionale) evidenziate nel periodo immediatamente antecedente la data di acquisizione delle immagini satellitari, hanno probabilmente permesso un'estensione dell'area caratterizzata da maggiori quantità di nutrienti inorganici disponibili al popolamento fitoplanctonico. Tale periodo, infatti, è risultato caratterizzato da intensa piovosità insistente sul bacino fluviale dell'Isonzo-Torre-Natisone, ossia sul bacino che convoglia dal Friuli collinare fino all'Isontino le proprie acque nel fiume Isonzo (Fig. 6). Ciò ha determinato un maggiore apporto di acque dolci nel Golfo e, di conseguenza, una più elevata disponibilità di nutrienti inorganici.

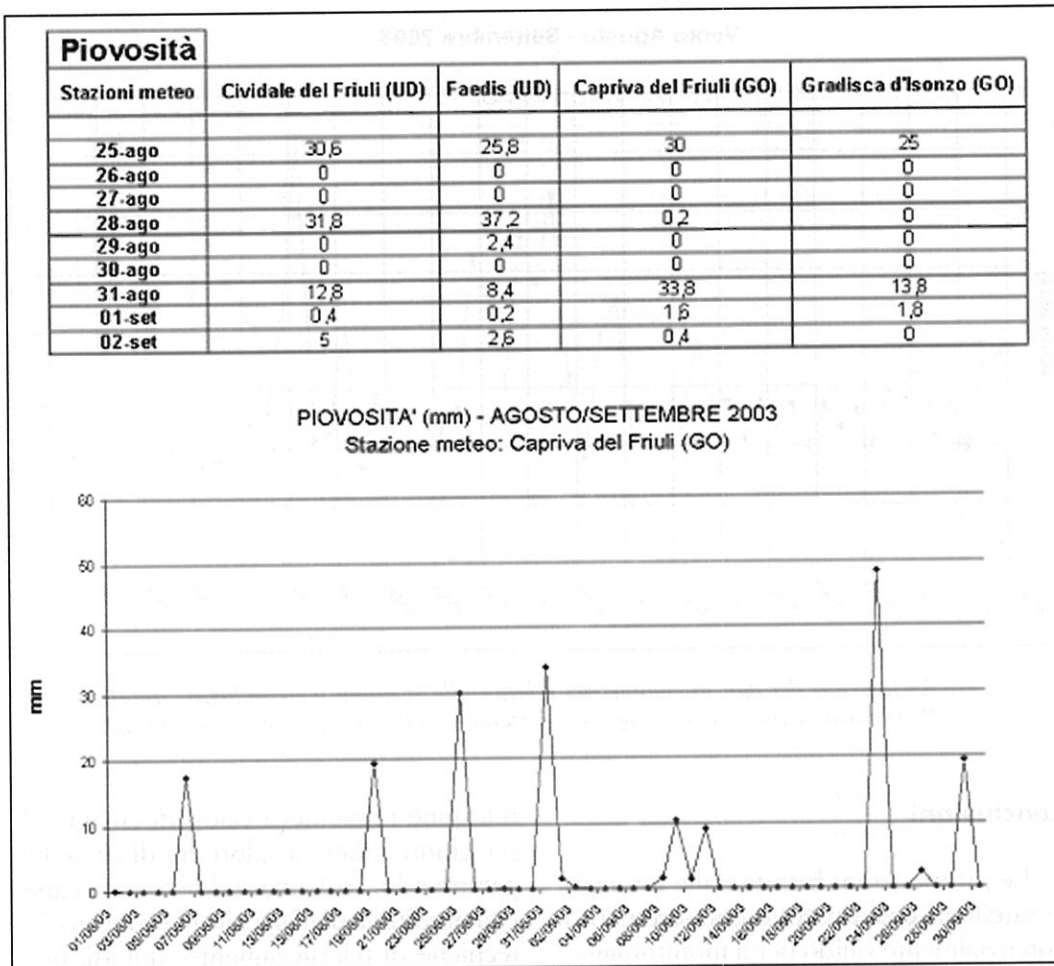


FIGURA 6 – 6a) Piovosità nel bacino dell'Isonzo-Torre-Natisone nei giorni precedenti all'acquisizione dell'immagine satellitare; 6b) Andamento della piovosità nei mesi di agosto e settembre 2003, stazione meteo di Capriva del Friuli (GO) (fonte: www.osmer.fvg.it).

3) I dati relativi all'intensità dei venti, registrati presso la stazione meteorologica sinottica n. 52 Piattaforma Paloma, hanno permesso di evidenziare, inoltre, la presenza di forti venti da ponente proprio in corrispondenza dei primi giorni del mese di settembre 2003 (Fig. 7). L'a-

zione dei venti ha probabilmente consentito il trasporto delle acque superficiali, ricche in nutrienti, verso l'area più orientale del Golfo permettendo l'incremento della biomassa fitoplanctonica evidenziato dagli elevati valori di clorofilla *a* misurati.

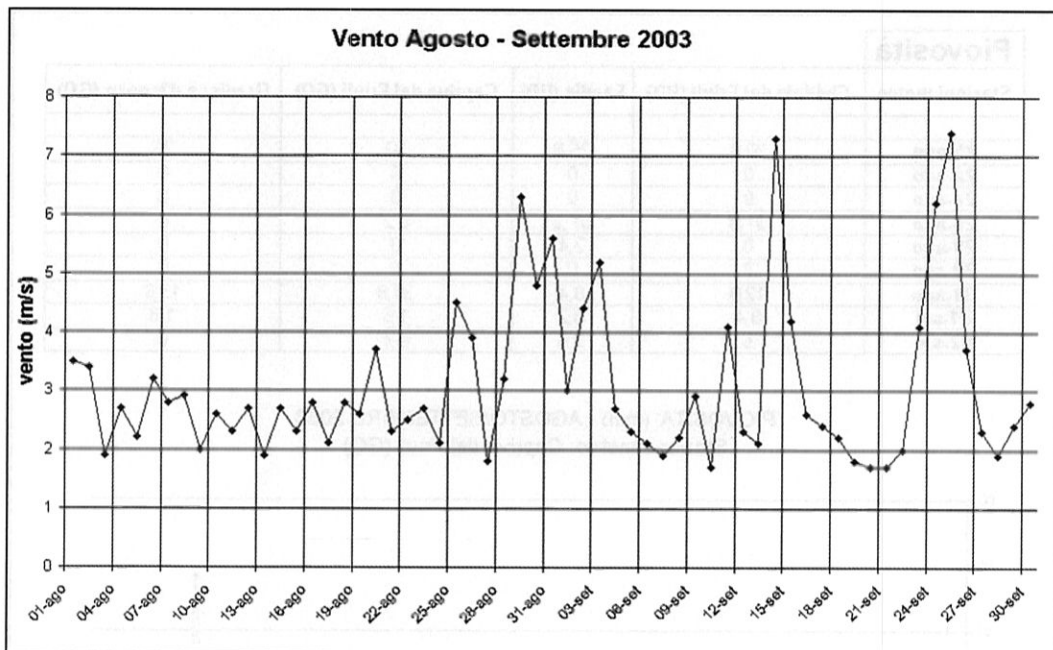


FIGURA 7 – Andamento dei dati anemometrici relativi alla stazione meteorologica sinottica n. 52 Piattaforma Palma, mesi di agosto e settembre 2003 (fonte: www.osmer.fvg.it).

Conclusioni

Le informazioni fornite dalle immagini satellitari costituiscono uno strumento potenzialmente valido per il monitoraggio dell'ambiente marino. Nel presente lavoro, l'utilizzo di immagini satellitari atmosfericamente corrette e l'implementazione di più variabili, in parte raccolte puntualmente, in parte derivanti dalle immagini satellitari, hanno garantito una migliore calibrazione del modello, consentendo una stima più attendibile della concentrazione della clorofilla nel Golfo di Trieste. Rispetto al modello basato unicamente sul confronto tra valori digitali della banda verde e della clorofilla (definito nel precedente lavoro), in cui l'indice di cor-

relazione r assumeva valori di circa 0.79, si è giunti, infatti, a valori di r di circa 0.9, garantendo, così, una soddisfacente capacità predittiva dell'algoritmo proposto. Le tecniche di telerilevamento, quindi, possono rappresentare, anche nel Golfo di Trieste, un'opportunità per superare il concetto di campionamento puntuale a vantaggio di una descrizione spaziale più completa.

In prospettiva futura, l'ulteriore validazione statistica del modello definito con questa metodologia, mediante acquisizioni più frequenti ed un maggior numero di prelievi, permetterà di poter affiancare questa tecnica al monitoraggio delle dinamiche spazio temporali della clorofilla nel Golfo di Trieste.

Ringraziamenti

Si desidera ringraziare: gli operatori del Servizio Meteorologico Regionale del Friuli Venezia Giulia (www.osmer.fvg.it), ed in particolare il dott. Nordio Sergio per l'efficiente collaborazione; l'ente EOS Data Gateway Center (Earth Observing System – NASA) per aver gratuitamente fornito l'immagine del sensore ASTER.

Bibliografia

- ABRAMS M., HOOK S. (2002), *ASTER User Handbook-Version 2*, JPL (Jet Propulsion Laboratory), NASA, Pasadena, 2002.
- ASMAT A., MANSOR S.B., MOHAMED M.I., MISPAN M.R. (2003), *Estimating Chlorophyll-a Concentration from Remotely Sensed Data in East Coast of Peninsular Malaysia*, GIS Development, n.3, Noida, India.
- BARUAH P.J., TAMURA M., OKI K., NISHIMURA H. (2001), *Neural Network Modelling of Lake Surface Chlorophyll and Sediment Content from Landsat TM Imagery*, In: «22nd Asian Conference on Remote Sensing and Processing», Singapore, 5-9 nov. 2001.
- BRAMBATI A., CATANI G. (1988), *Le coste e i fondali del Golfo di Trieste dall'Isonzo a Punta Sottile: aspetti geologici, geomorfologici, sedimentologici e geotecnica*, Hydrores 6: 13-28.
- DE FRANCESCO C., FRANZINI G., ZILIOI E., GIARDINO C. (2003), *Integrazione delle tecniche di telerilevamento nell'attività di monitoraggio del lago di Garda*, In «Atti della 7^a Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali», Milano.
- DE VITTOR C., DE PRÀ F. (2003), *Distribuzione della clorofilla a frazionata nella colonna d'acqua del golfo di Trieste: autunno 1998 – estate 2001*, Biol Mar Medit 10: 998-1002.
- FONDA UMANI S., CAUWET G., COK S., MARTECCHINI E., PREDONZANI S. (1997), *Chemical and biological seasonal patterns of the Gulf of Trieste: the example of early and late summer*, In: CAUWET G. PALOMA, *Production and accumulation of Labile Organic Matter in Adriatic*, EEC Environmental and Climate programme, final report part 2.
- LILLESAND T.M., KIEFFER R.W. (1999), *Remote sensing and Image Interpretation*, Fourth ed., New York, Wiley & Sons.
- LORENZEN C.J., JEFFREY S. (1980), *Determination of chlorophyll in seawater*, Technical Papers In Marine Science. SCOR-UNESCO, 35: 1-20.
- MALEJ A., MOZETI? P., MALA?I? V., TERZI? S., AHEL M. (1995), *Phytoplankton responses to freshwater inputs in a small semi-enclosed gulf (Gulf of Trieste, Adriatic Sea)*, Mar. Ecol. Prog. Ser., 120: 111-121.
- MOSETTI F. (1972), *Alcune ricerche sulle correnti nel Golfo di Trieste*, Boll Ass Geof Ital 21 (1/2): 33-38.
- NAUDIN J.J., MALACIC V., CELIO M. (1996), *Hydrological characteristics of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) during high fresh-water input in early summer*, Physical and biogeochemical processes of the Adriatic Sea (ELNA), Portonovo (Ancona) Italy, 23-27.
- OLIVOTTI R., FAGANELLI J., MALEJ A. (1986), *Impact of «organic» pollutants on coastal water - Gulf of Trieste*, Wat Sci Technol 18: 57-68.
- RITCHIE J.C., COOPER C. (2001), *Remote Sensing Techniques for Determining Water Quality: Application to TMDLs*, In: *TMDL Science Issue Conference*, S. Luis, Missouri, 5- 7 mar. 2001.
- ROSSI S., MOSETTI F., CESCONE B. (1968), *Morfologia e natura del fondo nel Golfo di Trieste*, Bollettino Soc Adriatica Scienze 56: 187-206.
- VAJANI L. (1980), *Elementi di statistica*, CEDAM, Padova.