

N.B. La parte rilevante ai fini del corso di Metodologie Ecologiche è quella riquadrata.

Telerilevamento e modelli matematici

Michele Scardi

La biomassa fitoplanctonica, generalmente espressa come concentrazione di clorofilla a, è l'indicatore di gran lunga più utilizzato per la descrizione sintetica dello stato trofico di un ecosistema pelagico.

La semplicità delle misure di concentrazione della clorofilla, soprattutto se effettuate in maniera esclusivamente strumentale (es. fluorimetria in vivo), ha reso disponibile una notevole mole di dati, ma è certamente con l'impiego di tecniche di telerilevamento che vengono prodotte le serie di dati più interessanti su grande scala spaziale e temporale.

E' ovvio che qualsiasi tipo di misura indiretta necessita di una adeguata calibrazione e che, nonostante tutto, il prezzo del maggior numero di dati acquisiti è costituito da una minore accuratezza delle misure. Nei casi in cui una grandezza presenta strutture spazio-temporali complesse la maggior quantità di informazione disponibile può largamente compensare un margine di errore superiore sulla rilevazione di ogni singolo dato. Il caso specifico della biomassa fitoplanctonica ricade senza dubbio in questa categoria.

La calibrazione degli algoritmi di conversione del segnale telerilevato in unità di biomassa fitoplanctonica non presenta grandi problemi in acque aperte e, in generale, su grande scala spaziale e temporale, sempre che si disponga di una sufficiente base di dati per la "verità mare". Nel caso dei sistemi costieri o in presenza di strutture di transizione (es. plumes di fiumi) questo processo si fa più critico, poichè l'interferenza di segnali di altra natura può non essere marginale.

Si consideri, ad esempio, il caso dell'algoritmo proposto da Brown & Simpson (1990):

$$C = a\gamma^{-b}$$

$$\gamma = \frac{R(440nm)}{R(550nm)}$$

$$a = -0.06$$

$$b = 1.80 + 0.38 \cdot \Sigma_i \quad (\text{per } 0 < \Sigma_i < 6 \text{ mg dm}^{-3})$$

In questo caso, come si può notare, la biomassa fitoplanctonica viene stimata come funzione del rapporto fra il segnale relativo a due differenti lunghezze d'onda, di un coefficiente costante e di un esponente che è a sua volta funzione lineare della concentrazione dei solidi sospesi. E' evidente che in acque di largo il termine complessivo relativo a questi ultimi tende al valore della sua costante.

Pur nei limiti legati ai problemi di interpretazione e conversione delle immagini telerilevate (ed alle condizioni meteorologiche), comunque, la copertura spazio-temporale garantita da queste ultime non è neppure lontanamente paragonabile a quella che si può ottenere attraverso un campionamento diretto. In particolare, la già citata sinotticità dell'acquisizione dei dati consente di poter analizzare la reale struttura spaziale della biomassa fitoplanctonica, senza cioè sovrapporre alla stessa la deriva temporale di ciascuna stazione di campionamento.

Ciò rende pienamente applicabili un insieme di tecniche di analisi spaziale che, se applicate a serie di dati acquisite in maniera tradizionale, possono fornire risultati di difficile interpretazione. Ad esempio, si può utilizzare un correlogramma spaziale come quello basato sull'indice I di Moran (1950) per inferire la scala dei gradienti o la dimensione caratteristica di una eventuale patchiness del sistema:

$$I(D) = \frac{\frac{1}{W} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{per } i \neq j$$

dove y_i è il valore della variabile analizzata rilevato nell'i-mo campione, p è il numero totale dei campioni, w_{ij} è un delta di Kronecker e W è la somma dei delta di Kronecker per un livello di distanza D .

E' ovviamente possibile testare la significatività dell'autocorrelazione spaziale per ciascun livello di distanza. Ciò fornisce indicazioni estremamente utili sulla distribuzione spaziale della variabile in esame, soprattutto nel caso in cui il correlogramma sia stato scomposto in due o più componenti (es. Nord-Sud ed Est-Ovest).

Esistono evidentemente molte alternative e/o complementi possibili a questo approccio. Restando nel caso di problemi univariati, oltre all'analisi spettrale, si consideri ad esempio la possibilità di utilizzare un variogramma per ottenere una stima della varianza attesa per insiemi di osservazioni effettuate in punti posti alla medesima distanza l'uno dall'altro, o quella di descrivere e confrontare la complessità dei patterns spaziali stimando della

dimensione frattale dell'immagine telerilevata (es. mediante il metodo del "blanket").

Per l'analisi di serie storiche gli approcci possibili corrispondono in larga misura con quelli di cui si è appena detto. In ambiente pelagico, d'altra parte, si deve considerare come la dinamica delle masse d'acqua rende impossibile, nella maggior parte dei casi pratici, separare la componente spaziale da quella temporale di un qualsiasi fenomeno di media e grande scala.

In ogni caso, comunque, l'analisi di serie spaziali e/o storiche di misure di biomassa fitoplanctonica può fornire informazioni di grande interesse non solo per la migliore conoscenza dei patterns e delle scale tipiche della sua distribuzione, ma anche per una più corretta modellizzazione della sua dinamica e dei flussi energetici in essa implicati. Si pensi, ad esempio, alla possibilità di definire all'interno di un sistema complesso dei comparti omogenei, realizzando una condizione che è alla base della maggior parte degli approcci modellistici.

Anche se può sembrare (ed in qualche misura è) semplicistico inquadrare le caratteristiche di un ecosistema sulla base di una sola grandezza, si deve considerare come nel caso in questione essa sia in effetti strettamente correlata con un insieme di parametri utili alla definizione di aspetti funzionali, oltre che strutturali, dell'ecosistema.

In particolare, la produzione primaria, cioè l'organizzazione del carbonio attraverso i processi fotosintetici, dipende essenzialmente dalla biomassa capace di esprimere tale funzione, pur essendo modulata da diversi altri fattori (primi fra tutti luce e temperatura).

Va sottolineato il fatto che, se una misura della biomassa definisce un intervallo potenziale di valori di produzione primaria, la valutazione diretta di quest'ultima per un ecosistema od un suo comparto fornisce indicazioni molto utili alla focalizzazione di un quadro dinamico dello stesso. Ad esempio, sulla base di una serie di dati di produzione primaria è possibile effettuare delle stime della quantità di azoto che il sistema è in grado di metabolizzare, trasferendolo al livello dei consumatori (erbivori).

Da un punto di vista pratico esistono diversi approcci alla modellizzazione della produzione primaria e ciascuna delle numerose soluzioni proposte si colloca all'interno di un continuum i cui estremi sono costituiti rispettivamente dalle formulazioni empiriche e da quelle analitiche.

Nel primo caso si cerca di sfruttare al meglio gli insiemi di dati disponibili, lavorando soprattutto sugli aspetti statistici del problema, mentre nel secondo si cerca di ricostruire la dinamica del processo sulla base delle conoscenze disponibili in merito ai sottoprocessi che si ritengono più rilevanti.

Se è evidente che i dati telerilevati si prestano in particolar modo a supportare l'approccio empirico, ciò è vero a maggior ragione nel caso degli ecosistemi pelagici. In questi ultimi la biomassa fitoplanctonica fotosinteticamente attiva è frazionata in un numero enorme di organismi unicellulari, distribuiti in maniera (teoricamente) omogenea nello strato superiore della colonna d'acqua ed è possibile esprimere la produzione primaria come funzione della concentrazione di tale biomassa.

Sulla base di questa ipotesi sono stati formulati un certo numero di modelli, la cui accuratezza, come è ovvio, è spesso vincolata a scale spaziali e temporali ben precise ed i cui parametri assumono valori specifici per sito e per stagione.

Un esempio classico di modello empirico è costituito dalle diverse variazioni sul tema della dipendenza lineare della produzione primaria giornaliera (P_d) dalla biomassa fitoplanctonica (B) e dalla luce, intesa come irradianza discendente alla superficie del mare (I_0) e modificata sulla verticale da un coefficiente di attenuazione (k). Una implementazione di questo approccio è presentata da Cole & Cloern (1984):

$$P_d = a + b \cdot B Z_p I_0$$

$$Z_p = \frac{4.61}{k}$$

Una formulazione del tutto analoga è quella proposta da Keller (1988), che utilizza la profondità della zona eufotica (Z_p , che corrisponde alla profondità a cui si raggiunge una irradianza pari all'1% di quella superficiale) al posto del coefficiente di attenuazione:

$$P_d = a + b \frac{B I_0}{k}$$

In entrambi i casi le applicazioni presentate erano relative ad aree costiere confinate e poco profonde, nelle quali è lecito ipotizzare che la biomassa fitoplanctonica sia distribuita uniformemente lungo la colonna d'acqua.

Su un'assunzione leggermente differente si basa un modello empirico, sempre di tipo lineare, ma ancor più semplice, proposto da Smith et al. (1982):

$$P_d = a + b \cdot B$$

In questo caso la biomassa fitoplanctonica (B) si deve intendere come valore medio nello strato superficiale corrispondente ad una

profondità ottica unitaria. E' importante sottolineare come la semplicità concettuale di questo modello trovi la sua giustificazione nel contesto estremamente specifico in cui è stato sviluppato (dati relativi ad una sola crociera).

Un'altra formulazione basata esclusivamente sulla biomassa fitoplanctonica è quella proposta da Brown *et al.* (1985):

$$P_d = \bar{P}_p \cdot Z_p$$

$$\bar{P}_p = 10^{1.25+0.73 \cdot \log B}$$

$$Z_p = 4.6 \cdot (6.9 - 6.5 \cdot \log B)$$

Si noti come in questo caso la stima della produzione sia limitata in funzione della profondità della zona eufotica (Z_p , stimata secondo Smith & Baker, 1978), che è anch'essa dipendente dalla biomassa fitoplanctonica. Infatti, all'aumentare della biomassa corrisponde un incremento della produzione primaria media per la zona eufotica \bar{P}_p , ma diminuisce la profondità della zona eufotica stessa. Ciò rende conto, sia pure in maniera semplificata, degli effetti del fenomeno del self-shading.

Se è vero che la semplicità delle relazioni utilizzate costituisce il punto di forza dei modelli empirici, è anche vero che la validità di ogni singolo modello è strettamente legata all'insieme di dati su cui esso è stato calibrato. Il più ovvio sviluppo di questo tipo di formulazioni è costituito da un approccio di tipo semi-analitico, che tenti di coniugare l'informazione che emerge dagli insiemi di dati con quella, anche di tipo teorico, che descrive alcuni processi fondamentali (es. fotosintesi massima per unità di biomassa).

Un semplice modello semi-analitico è quello proposto da Eppley *et al.* (1985), che, attraverso una regressione lineare multipla, stima la produzione primaria giornaliera in funzione della biomassa, della temperatura e del fotoperiodo:

$$\ln P_d = a + b \cdot \ln B - c \cdot f(T) + d \cdot f(DL)$$

E' interessante notare come questa soluzione, pur essendo stata ottimizzata per un'area geografica ben determinata, consente di tener conto della dinamica stagionale della produzione primaria.

Un modello semi-analitico assai più complesso è quello sviluppato da Balch *et al.* (1989), che esprime la produzione primaria nello strato della colonna d'acqua corrispondente alle prime 5 profondità ottiche in funzione della biomassa, della luce e della temperatura:

$$\Pi = \sum_{n=0}^{n=5} B_{od} \cdot I \cdot \Psi'$$

dove B_{od} è la biomassa fitoplanctonica totale per profondità ottica, I è l'irradianza discendente e Ψ' rappresenta l'efficienza fotosintetica espressa dal popolamento fitoplanctonico.

Pur senza addentrarsi in dettagli sulla formulazione di quest'ultimo modello, è importante rilevare come esso, nell'ambito di quelli presentati in questa sede, sia il solo a non avere un termine costante nè una struttura necessariamente lineare, poichè Ψ' , se esplicitato, rappresenta un termine alquanto complesso. E' evidente, comunque, che un modello di questo tipo è assai più flessibile e generalizzabile di un modello strettamente empirico: esso, infatti, contiene una descrizione del processo modellizzato, sia pure in forma semplificata, e non rappresenta una semplice espressione della struttura di uno specifico insieme di dati.

Tutti i modelli empirici e semi-analitici, comunque, necessitano di dati di campo per poter essere applicati, poichè, in un modo o nell'altro, essi sono finalizzati alla stima di una grandezza causalmente dipendente da quella effettivamente rilevata. Essi, di conseguenza, si prestano in maniera ottimale ad essere applicati a serie di dati telerilevati.

Un modello analitico, al contrario, può essere sviluppato, in teoria, anche senza fare alcun riferimento ad una specifica base di dati osservati. I processi ecologici ritenuti rilevanti ai fini della simulazione vengono formalizzati ed incorporati in un sistema di equazioni differenziali (ordinarie o parziali in funzione della dimensionalità del modello) che consente di rappresentare la dinamica delle variabili di stato. Un esempio di questo tipo di modello è il seguente:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} &= (G_F \cdot l_{F(L)} \cdot l_{F(N)}) \cdot F - (G_Z \cdot l_{Z(T)}) \cdot Z - m_F \cdot F - k_s \cdot F \\ \frac{dZ}{dt} &= (1 - k_{na}) \cdot (G_Z \cdot l_{Z(T)}) \cdot Z - r_{Z(T)} \cdot Z - m_Z \cdot Z \\ \frac{dN}{dt} &= k_{na} \cdot (G_Z \cdot l_{Z(T)}) \cdot Z + r_{Z(T)} \cdot Z + m_F \cdot F - (G_F \cdot l_{F(L)} \cdot l_{F(N)}) \cdot F \end{aligned}$$

dove F , Z ed N rappresentano rispettivamente la biomassa fitoplanctonica, quella degli erbivori zooplanctonici e la concentrazione dell'azoto inorganico. Tutti i rimanenti termini esprimono dei tassi di crescita massimi (G_x), dei coefficienti di limitazione di questi ultimi (l_x), dei tassi di mortalità (m_x), di respirazione (r_x) o altri processi (k_x). Il livello di formalizzazione di ciascuno di questi termini varia

considerevolmente: alcuni sono assunti come costanti, ma altri possono implicare relazioni anche molto complesse.

Il comportamento di un modello analitico, tuttavia, dovrebbe essere sempre verificato, al di là dell'esercizio teorico, contro una o più serie di dati. Quanto più robusto si dimostra un modello rispetto alle procedure di calibrazione/validazione, tanto più è probabile che esso contenga una descrizione efficace del sistema simulato e tanto più grande, di conseguenza, risulta il suo valore previsionale e/o descrittivo.

Poichè la mancanza di serie di dati adeguate è spesso un fattore limitante nello sviluppo dei modelli, anche se di tipo analitico, è evidente che il ruolo che può essere assunto dal telerilevamento può essere di primaria importanza.

In generale, dunque, risulta evidente come le possibili interazioni fra telerilevamento di dati di biomassa fitoplanctonica e modellizzazione della produzione primaria pelagica siano molteplici. Alcune fra le più interessanti possono essere schematizzate come segue:

immagine telerilevata $\xrightarrow{\text{algoritmo di conversione}}$ biomassa fitoplanctonica

1) biomassa fitoplanctonica $\xrightarrow{\text{modello empirico/semi-analitico}}$ produzione primaria

produzione primaria $\xrightarrow{\text{calibrazione/validazione}}$ modello analitico

immagine telerilevata $\xrightarrow{\text{algoritmo di conversione}}$ biomassa fitoplanctonica

2) biomassa fitoplanctonica $\xrightarrow{\text{analisi serie spaziali/temporali}}$ patterns / dinamica del sistema

patterns / dinamica del sistema \Rightarrow compartimentazione e stima errore modelli analitici

modelli analitici $\xrightarrow{\text{simulazione}}$ biomassa fitoplanctonica

3) biomassa fitoplanctonica \Rightarrow calibrazione algoritmi di conversione immagini telerilevate

serie di immagini telerilevate $\xrightarrow{\text{algoritmo di conversione}}$ biomasse fitoplanctoniche

4) biomasse fitoplanctoniche $\xrightarrow{\text{analisi temporale delle serie spaziali}}$ dinamica dei patterns del sistema

dinamica dei patterns del sistema $\xrightarrow{\text{modelli empirici/semi-analitici}}$ dinamica livelli trofici superiori

Le possibilità di integrazione delle tecniche di analisi di serie storiche e spaziali con la modellistica applicata all'ecologia marina sono certamente molto più articolate rispetto a quanto non emerga in questa sede. E' evidente, tuttavia, che il ruolo del telerilevamento in questo contesto è destinato a diventare sempre più importante, soprattutto se l'informazione che esso rende disponibile sarà

effettivamente fruibile da una più vasta base di ricercatori ed in primo luogo dai modellisti.

Bibliografia.

- Balch W.M., Eppley R.W. & Abbott M.R., 1989. Remote sensing of primary production - II. A semi-analytical algorithm based on pigments, temperature and light. *Deep-Sea Research*, 36(8): 1201-1217
- Brown J. & Simpson J.H., 1990. The radiometric determination of total pigment and seston and its potential use in shelf areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31: 1-9
- Brown O.B., Evans R.H., Brown J.W., Gordon H.R., Smith R.C. & Baker K.S., 1985. Phytoplankton blooming off the U.S. East Coast: A satellite description. *Science*, 229: 163-167.
- Cole B.E. & Cloern J.E., 1984. Significance of biomass and light availability to phytoplankton productivity in San Francisco Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 17: 15-24
- Eppley R.W., Stewart E., Abbott M.R. & Heyman U., 1985. Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. Introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. *Journal of Plankton Research*, 7: 57-70
- Keller A.A., 1988. Estimating phytoplankton productivity from light availability and biomass in the MERL mesocosms and Narragansett Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 45: 159-168
Smith R.C. & Baker K.S., 1978. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 23: 247-259
- Moran P.A.P., 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37: 17-23
- Smith R.C., Eppley R.W. & Baker K.S., 1982. Correlation of primary production as measured aboard ship in Southern California coastal waters and as estimated from satellite chlorophyll images. *Marine Biology*, 66: 281-288