

GIS e ricerca ambientale marina: problematiche modellistiche

Introduzione

Gli ambienti marini, ed in modo particolare le aree costiere, sono ecosistemi caratterizzati da una elevatissima variabilità, fatto che rende difficile la loro comprensione e modellizzazione, nonché un effettivo ed efficace controllo operativo. In tal senso, il bacino del mare Mediterraneo e le zone costiere italiane in genere non fanno eccezione.

Per comprendere lo stato e l'evoluzione di tali ambienti le informazioni *on line* messe a disposizione dai vari centri di ricerca non sono più una risposta adeguata: se è vero che si rende sempre più necessaria un'opera di armonizzazione della gestione dell'informazione entro una rete di calcolatori che supporti una gestione operativa, sta divenendo fondamentale sviluppare un sistema informativo strutturato e dipendente dal tempo, col fine di integrare i dati a carattere ambientale ed i risultati dei modelli numerici alla corretta scala di variabilità osservata.

Per raggiungere una visione integrata nello spazio e nel tempo delle componenti caratterizzanti l'ecosistema marino, l'utilizzo della tecnologia GIS (Geographical Information System) è di sicuro ausilio, essendo essa il risultato di un'applicazione integrata di tecnologie per la gestione di dati georeferenziati. Nel caso marino, però, non possiamo trascurare l'aspetto dinamico dei fenomeni in gioco (Masserotti, Montondi, Zucchelli, 1995).

Nell'affrontare lo sviluppo di questo prodotto, il mondo dei GIS (Worboys, 1995) e quello dei modelli matematici ambientali (Carniel, Bergamasco, 1995) devono necessariamente confrontarsi su un certo numero di tematiche comuni.

Fase di acquisizione del dato

Lo sviluppo di un GIS marino deve necessariamente considerare la complessità dell'ecosistema in esame.

Le variabili fisiche che caratterizzano un sistema marino sono la velocità del fluido (che è una grandezza vettoriale proiettabile nelle tre componenti x, y, z), e diverse grandezze scalari, quali il livello della superficie marina, la temperatura, la salinità e la densità; tutte queste grandezze sono funzioni della posizione e della profondità.

Lo studio di altri processi, che vengono sempre più spesso indagati per giungere ad una maggiore comprensione del sistema marino, portano inevitabilmente ad una ulteriore complessità del sistema e ad una crescita del numero di variabili di stato considerate, quali parametri chimici, ottici o biologici. Se tra gli obiettivi trova per esempio posto la descrizione di fenomeni eutrofici, verranno introdotte concentrazioni di nutrienti, densità delle varie specie autotrofe, ecc.

Oltre ai dati che vengono acquisiti *in situ*, anche quelli ottenuti con l'utilizzo di tecniche di *remote sensing* stanno assumendo un'importanza sempre maggiore nello studio dell'evoluzione spazio-temporale dei fenomeni marini (diffusione di inquinanti, trasporto di sedimenti, ecc.).

Dobbiamo inoltre ricordare che la descrizione delle interazioni che avvengono all'interno delle masse d'acqua è oggi largamente affidata alla soluzione, tramite calcolatori elettronici, di modelli matematici numerici che, con l'ausilio di un numero elevatissimo di dati sperimentali, riescono ad essere validi strumenti di comprensione per la



fase gestionale e previsionale (Carniel, Bergamasco, 1995). Anche questo dato "modellato" deve poter essere utilizzato in un GIS marino.

All'interno di un GIS, i modelli di dati usati sono:

- il *vector model*, usato per descrivere oggetti separati da contorni ben definiti.

- il *raster data model*, in cui si tratta con quantità conosciute solo in alcuni punti, che possono essere rappresentate su griglie regolari od irregolari.

Nel caso del GIS marino si possono facilmente integrare i due modelli di dati. Infatti le primitive che un GIS deve adottare per rappresentare campi scalari fisici, quali salinità e temperatura, sono raster; la velocità è un vettore, però conosciuto solo in alcuni punti, e quindi può essere rappresentato ancora da un raster data model o attraverso tecniche di *contouring*.

Per quanto riguarda i dati *telerilevati*, essi vengono di solito rappresentati in formato raster come matrice di celle elementari (*pixel*).

I dati riguardanti il mare possono essere sommariamente divisi entro due classi, a seconda della tipologia di acquisizione dei medesimi.

Alla prima classe appartengono i dati ottenuti durante le campagne oceanografiche di misura, ove sensori montati su di una sonda multiparametrica¹ calata fino al fondo acquisiscono informazioni a varie profondità lungo la colonna d'acqua, mentre il posizionamento della nave fornisce le coordinate spaziali e temporale.

Nell'altra classe trovano posto i dati provenienti da *catene correntometriche*. La singola catena, solitamente detta *mooring*, è costituita da una serie di strumenti fissati ad un cavo, a sua volta ancorato al fondale marino; in questo caso il punto geografico e la profondità delle acquisizioni sono conosciuti con precisione, e la catena viene lasciata in loco per un certo intervallo di tempo, così da fornire una serie temporale dei valori misurati. L'informazione risulta quindi estremamente dettagliata nel tempo, ma assai ridotta nello spazio.

La quantità di dati disponibili per lo sviluppo dei modelli marini è molto carente, soprattutto perché l'uomo vive ai margini del mare lungo le sue coste, e perché il mare stesso risulta opaco alle radiazioni elettromagnetiche. Appare chiaro quindi che solo misure *in situ* possono fornire informazioni sulla struttura verticale delle masse d'acqua; tali misure sono peraltro costose, dato che risulta costoso approntare una campagna oceanografica e che le strumentazioni impiegate sono esposte ad elevati rischi di corrosione.

Vedendo la cosa dal punto di vista di un esperto di

GIS, la scarsità di informazioni ci porta a dire che nessun dato dovrebbe essere acquisito invano, visto il suo alto valore intrinseco.

Poiché l'acquisizione di dati avviene utilizzando metodologie ed apparecchiature tra loro generalmente diverse, ne deriverà inevitabilmente un database eterogeneo. I data models devono quindi essere disegnati col chiaro intento di accettare e gestire dati provenienti da varie campagne ed aventi quindi differenti caratteristiche. Fatto ancor più importante, tutti i dati provenienti da campagne di misura devono essere opportunamente documentati e certificati, sia rispetto agli strumenti, sia rispetto alle metodologie di acquisizione adottate.

Il set di dati raccolti nelle campagne oceanografiche fornisce un' "immagine" in finestre spazio-temporali ben definite (Fig. 1); in generale la densità informativa di queste griglie 4-D non è omogenea, dato che gli assi *x-y* sono poveri di informazioni rispetto all'asse *z*.

Durante una calata di CTD, infatti, vengono raccolte molte informazioni lungo l'asse verticale, mentre la posizione del natante resta praticamente invariata, e la stessa scarsità si riscontra per l'asse temporale *t*. Al contrario, nel caso di catene correntometriche la serie temporale è estremamente ricca, mentre l'informazione lungo gli assi *x-y* è addirittura puntiforme (Fig. 2).

È importante fare notare che al dato oceanografico puntualmente raccolto viene in genere attribuito un significato volumetrico, sia come valore medio di una certa area spaziale che come intervallo temporale; per ricostruire l'informazione ove questa non è stata direttamente raccolta, nasce quindi l'esigenza di applicare delle procedure interpolative nel dominio spazio-temporale.

Per quanto riguarda il GIS, l'applicazione di questa tecnologia all'ambiente marino diviene particolarmente complessa, dato che è ora necessario trattare informazione a 4 dimensioni, cosa che ancor oggi non è fattibile con prodotti commerciali. Il GIS deve inoltre tener conto dell'aspetto dinamico dell'ambiente in cui il dato viene misurato, oltre che essere in grado di "costruire" i dati mancanti in uno dei 4 assi.

Da questo ne consegue che è indispensabile per un GIS marino integrare nella sua architettura sia modelli statistici che modelli evolutivi.

Una procedura interpolativa statistica, nota come analisi oggettiva (Bergamasco, Pierazzo, 1992), calcola le quantità fisiche in ogni punto del dominio attraverso la miglior combinazione lineare delle misure stesse, pesata con il campo di covarianza che esse descrivono. Essa è in effetti una

procedura "oggettiva", ma cieca alla variabilità, nel senso che il metodo non risulta applicabile a fenomeni "non quasi stazionari". Nel caso più generale, quindi, si rende necessario considerare fit dinamici dei dati stessi, noti come "data assimilation" (Bergamasco, Malanotte-Rizzoli, Thacher, Long, 1993), connettendo la fase di acquisizione con quella di processamento.

In questo contesto un GIS può essere considerato come un geo database che può archiviare e recuperare dati, sulla base di concetti geografici. Le richieste cui un GIS marino deve soddisfare richiedono lo sviluppo di un database geografico particolarmente "intelligente", in grado cioè non solo di condurre un'operazione di data storage-retrieval, ma anche di "costruire" dati in punti dell'area geografica in cui essi non sono stati campionati.

In altre parole, laddove oggi si risponde ad una query di dati esistenti del tipo Select (V) x, y, z, t ed il dato viene restituito se esiste il valore di quel parametro ed esso è inserito nel punto x, y, z, t , bisognerà sviluppare uno strumento che risponda ad una query dove si chiede il valore del parametro in x, y, z, t diversi da quelli disponibili.

Questo significa che il GIS dovrebbe contenere un modello interpolativo nel cuore stesso del DBMS (Data Base Management System); è ovvio che solo modelli universalmente considerati idonei debbano essere presi in considerazione.

Fase di preprocessing dei dati

Per poter utilizzare correttamente i dati acquisiti durante le campagne di misura, occorre seguire alcune fasi: la prima di esse, ovviamente, consiste nella *calibrazione* ed eventuale intercalibrazione degli strumenti utilizzati.

La seconda, nota generalmente come *Application Independent Preprocessing (AIP)*, si occupa di preprocessare i dati al fine di liberare la misura da alcune problematiche connesse alla tecnica di acquisizione, quali movimenti ondulatori del natante, forti gradienti verticali che possono saturare i sensori, ecc.

La terza fase dipende invece dal fenomeno particolare che si intende studiare, ed è per questo detta *Application Dependent Preprocessing (ADP)*. Essa ha lo scopo di adeguare la grana informativa lungo l'asse verticale a quella ottenuto lungo la direzione $x-y$: va infatti ricordato che le scale orizzontali sono alcuni ordini di grandezza maggiori rispetto a quella verticale.

Parlando in termini di GIS, un ADP è in un certo

senso un errore; dato che un GIS è un integratore di dati che deve soddisfare molteplici richieste, la cui gamma completa è in un certo qual modo imprevedibile, ci si deve porre con estrema cautela nei confronti di ogni singolo dato, e trattarlo nel modo più neutro possibile.

I dati potrebbero quindi essere immagazzinati immediatamente dopo la fase di AIP, ma nel caso marino questo può risultare difficoltoso, data la scarsa prevedibilità d'uso degli stessi.

Per disegnare l'architettura di un GIS, è necessario definire chiaramente ed univocamente il modello concettuale del dato: si potrebbe allora definire una densità standard di informazione, non così ridondante come quella che caratterizza il dato originale, ma nemmeno così povera come quella del dato specifico ricavato dall'applicazione dell'ADP.

Rimane comunque il problema che la risoluzione spaziale è diversa lungo $x-y$ oppure lungo z , e questo sia per motivi collegati a capacità intrinseche degli strumenti di misura, sia in funzione del fenomeno allo studio.

Fase di processing dei dati

Si possono identificare quattro tipi principali di *data processing* all'interno dell'attività oceanografica:

a) Inizialmente alle variabili di stato simulate debbono essere attribuite delle *condizioni iniziali*. Per ogni volumetto spaziale definito dalla griglia del modello da usare, è necessario avere il valore delle grandezze primitive quali velocità, temperatura, salinità, densità, ecc: tale campo tridimensionale, ottenuto generalmente attraverso procedure di analisi oggettiva, rappresenta la condizione iniziale delle variabili integrate nel modello numerico.

b) Per poter proseguire l'integrazione numerica del modello è necessario fornirgli i valori delle variabili lungo i bordi, definendo opportune *boundary conditions (condizioni al contorno)*: anche in questa fase sono necessari dati sperimentali reali.

c) Il dato reale diviene ancora necessario per *calibrare* i parametri liberi del modello (ad esempio il coefficiente di attrito o quello di viscosità turbolenta) e quando si affronta la fase di *validazione*, per comparare i risultati misurati con quelli ottenuti dalla simulazione.

d) Questo confronto, spesso solo qualitativo, può essere formalizzato in procedure di ottimizzazione che minimizzano una funzione costo, rappresentante la misura della distanza del dato sperimentale da quello modellato. In questo caso si parla di *fit dinamico* dei dati, per il quale i campi



finali non solo sono interpolati nei punti voluti, ma anche dinamicamente consistenti.

Tutte queste attività sono attualmente condotte senza alcuna interfaccia con un GIS, e spesso neanche con DBMS (Data Base Management System).

Il percorso di un'attività di studio descrittivo-predittivo per un bacino marino viene descritto nella Fig. 3.

In conclusione, l'integrazione tra modelli matematici ambientali ed uno strumento di data management per l'ambiente marino, come un DBMS standard o un GIS, può aiutare il modellista numerico nella fase di implementazione ed affinamento del modello stesso.

In particolare potrebbe sostenere l'onere della gestione dei dati seguendo alcune procedure standardizzate, oppure avere incorporati quei modelli interpolativi statistici che compiono operazioni di analisi oggettiva. Questo faciliterebbe il modellista, consentendogli di concentrarsi di più sulle interazioni caratterizzanti i fenomeni allo studio e quindi la struttura vera e propria del modello prognostico.

Per rendere però fruttuoso l'incontro della tecnologia GIS con il campo della modellistica ecologica, si dovrà necessariamente puntare ad una maggiore integrazione del software GIS con i modelli di simulazione di fenomeni ambientali, e simultaneamente essere in grado di gestire la referenziazione cronologica.

Sebbene la realizzazione e la gestione di un GIS marino si presentino quindi come compiti di difficile e costosa

realizzazione, l'applicazione delle tecnologie GIS alla modellistica dell'ambiente marino sembra estremamente promettente per entrambe le discipline; questa integrazione darebbe un notevole contributo alla conoscenza dell'ecosistema marino, altrimenti non solo difficoltosa ma in alcuni casi quasi impossibile.

Nota

¹ Generalmente queste sonde misurano i valori di conducibilità, temperatura e salinità dell'acqua, e per questo sono note col termine CTD.

Bibliografia

- Masserotti, M.V., Montomoli, A., e Zucchelli, E., *Trattamento dell'informazione geografica in ambiente marino*. Technical Report C95-43, CNR-CNUCE, 1995.
- Worboys, M.F. *GIS: A Computing Perspective*. Taylor & Francis Ed., 1995.
- Carniel, S., Bergamasco, A., «La modellistica ecologica come mezzo per la comprensione ambientale: un esempio applicato all'ecosistema Laguna di Venezia - Mare Adriatico», *Ambiente, Risorse e Salute*, 41, 1995, pagg. 18-23.
- Bergamasco, A., Pierazzo, E., *Objective analysis of biochemical data from oceanographic data from oceanographic POEM campaigns. Part I - Methodology*. Technical Report 162. CNR-ISDGM, 1992.
- Bergamasco, A., Malanotte-Rizzoli, P., Thacker, W.C., e Long, R.B., «The seasonal steady circulation of the Eastern Mediterranean determined with the adjoint method», *Deep Sea Res.*, 40, n. 6, 1993, pagg. 1269-1298.

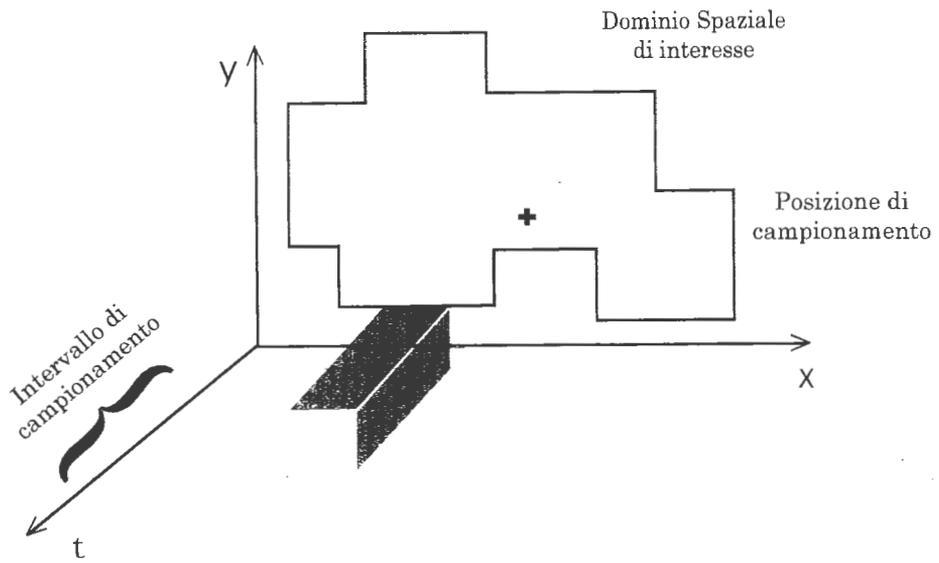


FIG. 1. Validità spatio-temporale delle acquisizioni durante il campionamento in "cruise".

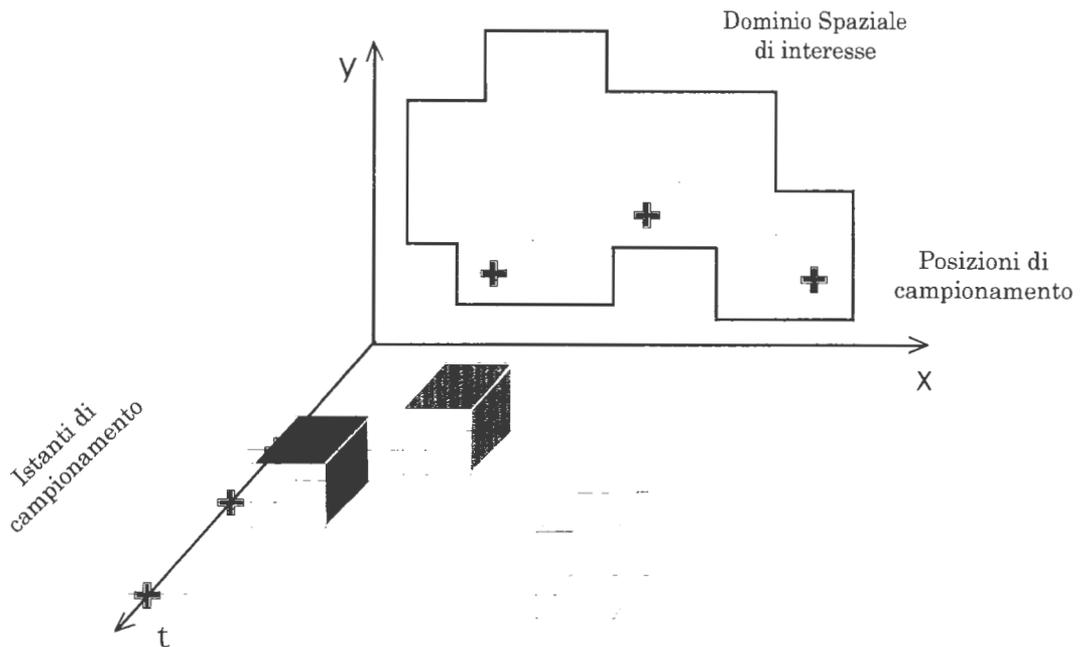


FIG. 2. Validità spatio-temporale delle acquisizioni durante il campionamento in "mooring".



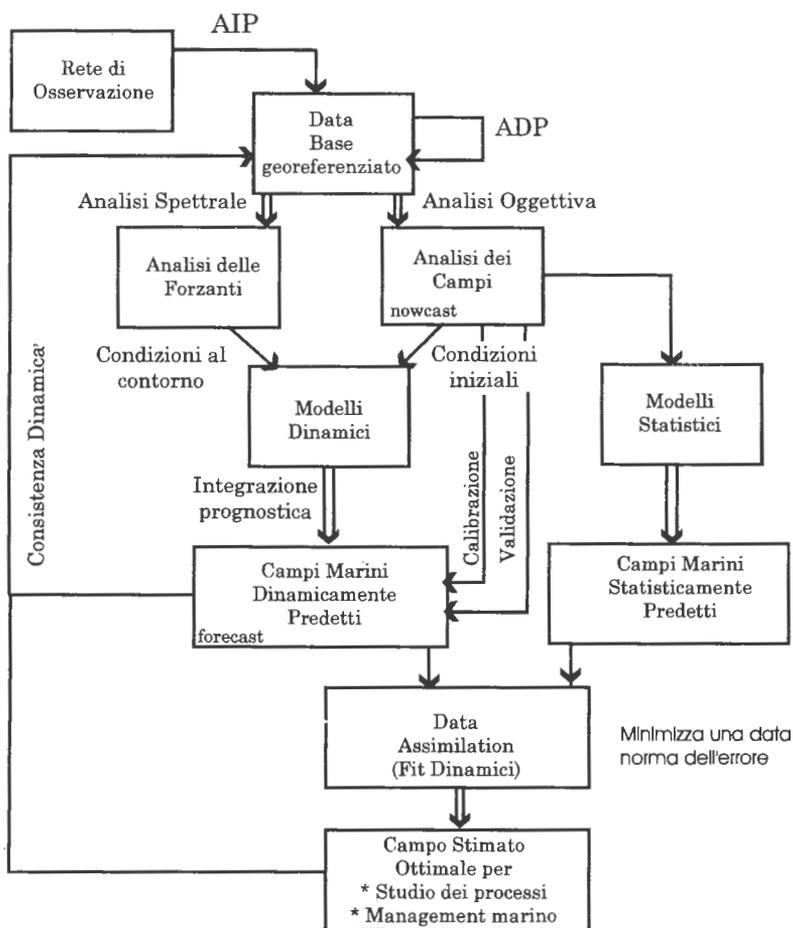


FIG. 3. Diagramma dell'attività di studio descrittivo-predittivo di un bacino marino.