Bollettino dell'A.I.C., n. 121-122 / 2004

RIFLESSIONI SUGLI ASPETTI CARTOGRAFICI DI UN SISTEMA GIS INTEGRATO SULLA LAGUNA VENETA

NOTES OVER CARTOGRAPHIC ISSUES OF AN INTEGRATED GIS FOR THE LAGOON OF VENICE

Alberta Bianchin (*)

(*) Laboratorio GEDDeS, IUAV-DP, Ca' Tron, S.Croce 1957, 30135 Venezia, tel. 041.2572300, fax 041.5240403. e-mail: *alberta@iuav.it*.

Riassunto

L'importanza dei fenomeni dinamici nell'ecosistema lagunare ha portato a concepire e realizzare un prototipo di sistema informatico geografico che integra le potenzialità del Gis in quanto strumento di gestione e rappresentazione dei dati spaziali con quelle di modelli matematici e di automi cellulari per il trattamento di dati spazio- temporali. Si tratta di una struttura modulare basata sull'autonomia di ogni ambiente di lavoro, dove il flusso dei dati dal Gis ai modelli dinamici e viceversa viene assicurato da procedure di scambio appositamente sviluppate. Grazie all'interoperabilità il modulo Gis diventa lo strumento per rappresentazioni multi- livello e la base per lo sviluppo di un ambiente cartografico di lavoro.

Parole chiave: interoperabilità, modelli dinamici, Gis.

Abstract

The relevance of dynamic phenomena in lagoon ecosystems has led to the conception of a prototype of geographic information system which integrates Gis potentials of spatial data representation and processing with those of mathematical and cellular automata models for the spatio-temporal treatment of data. It is a modular framework which preserves the autonomy of each processing environment, while procedures for data exchange are developed which enable data flow in both directions: from Gis to models and from models to Gis. Thanks to the interoperability, the Gis module becomes the tool for multi- level representations. It displays potentials for developing a working environment designed for the production of cartography.

Contesto del lavoro

Il tema qui affrontato, sviluppato nell'ambito di una ricerca MURST (Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica) - Sistema Lagunare Veneziano è quello di costruire un prototipo Gis per la Laguna di Vene-

zia. Ciò ha comportato una riflessione generale sulle caratteristiche che un tale sistema dovrebbe avere in relazione evidentemente ai fenomeni più importanti che si presentano in Laguna e alle finalità di gestione di tali fenomeni. Questa riflessione ha individuato nel controllo dell'inquinamento dell'ecosistema lagunare l'obbiettivo globale del nostro progetto di Gis e definito uno schema di lavoro che raggruppa i dati da organizzare nel sistema in tre sotto sistemi: il sistema antropico, il sistema naturale e il sistema laguna (tav.1).

Una tale lista descrittiva necessita per essere introdotta nel Gis di due ulteriori fasi di analisi: la descrizione dei dati secondo uno schema che tenga conto per ogni tipologia di dato del metodo di acquisizione del dato stesso e della sua significatività e la trascrizione di tale schema in quello che N. Chrisman (1997) chiama *measurement framework*.

La seconda fase richiede la definizione delle scale di misura significative per quel dato, come sappiamo, nominali, ad intervalli o continue, e questo per le tre variabili dell'informazione geografica tema, spazio, tempo.

L'analisi dei dati ci ha ben presto portato alla constatazione che l'insieme del sistema non poteva essere trattato secondo lo schema cartografico, ovvero tempo fisso, tema controllato (la legenda) e spazio misurato (il riporto geometrico degli oggetti sul piano cartografico). Infatti la natura dinamica di fenomeni come correnti, maree, ma poi anche diffusione degli inquinanti provenienti da varie fonti di immissione, richiedevano un diverso *measurament framework* nel quale la variabile tempo non poteva essere assunto come fisso pena la perdita di significato del dato stesso.

Quindi si doveva tener conto della diversa tipologia di dati e individuare strumenti in grado di gestire queste diverse strutture dell'informazione geografica. Si è pensato a una soluzione di tipo modulare nella quale:

1) i vari ambienti di lavoro sono nettamente separati
2) il Gis svolge un ruolo di perno intorno a cui si articolano gli altri moduli,
3) la comunicazione tra i vari moduli avviene attraverso un *set* di protocolli di scambio.

Sul *measurament framework*

Apriamo una parentesi. Per capire il problema è necessario partire dalla definizione di Informazione geografica, definita come una entità caratterizzata da tre variabili indissociabili tema, spazio, tempo. Prendiamo come esempio l'altezza di marea (tema) alle ore 12 del giorno X (tempo), misurata nella stazione di Punta della Salute (spazio). Se noi vogliamo rappresentare questa informazione geografica dobbiamo fare delle scelte, riducibili a questo schema concettuale: una variabile viene fissata, una seconda controllata, una terza misurata. Vediamo le varie alternative: fisso il tempo (ore 12 del giorno X), controllo, nel senso di avere solo un numero definito di possibili posizioni, lo spazio ovvero vengono fissati su una carta i punti in cui vi sono le stazioni di rilevamento, e misuro in quei punti il valore dell'altezza della marea.

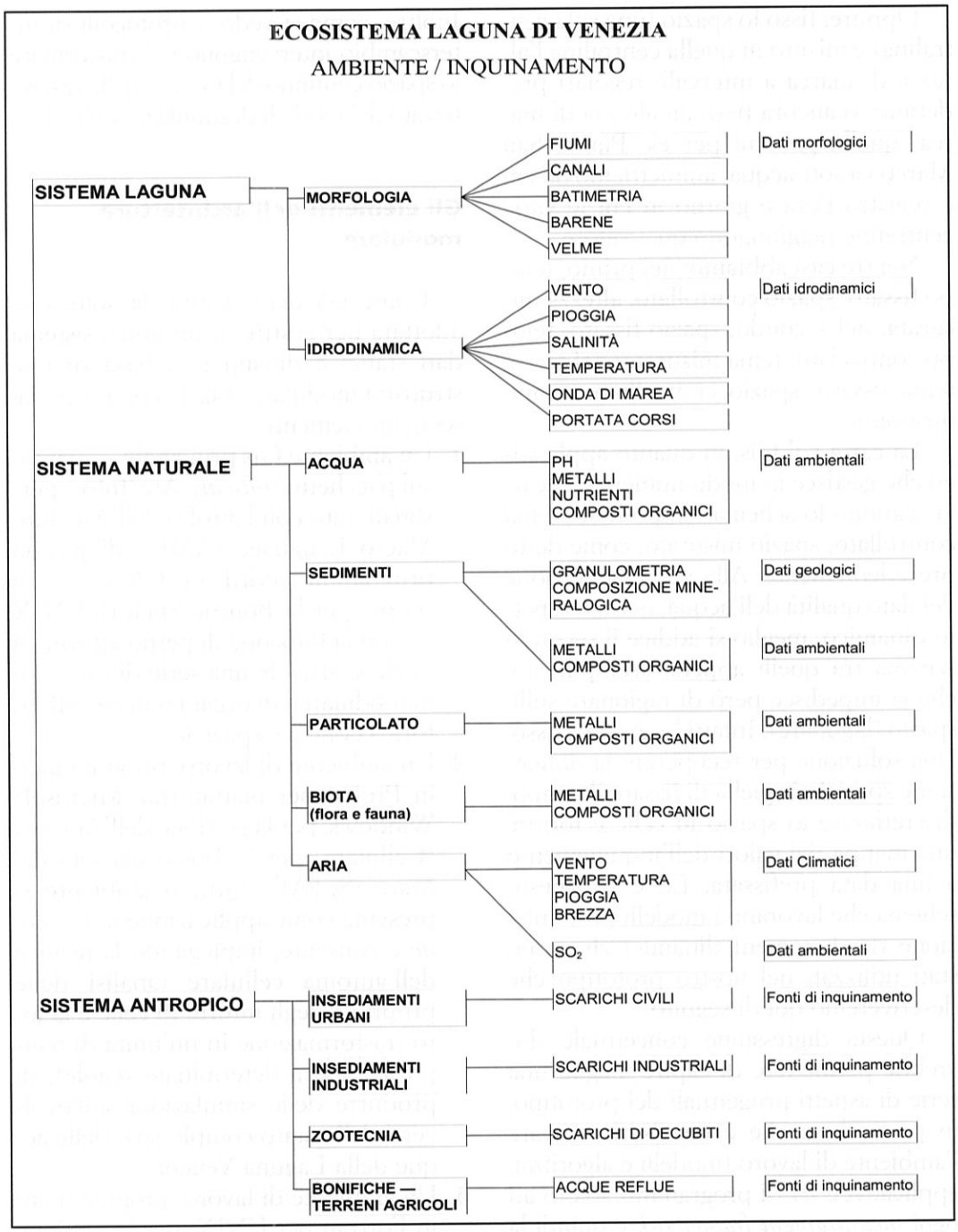


TAVOLA 1 – Analisi dell'ecosistema lagunare.

Oppure: fisso lo spazio (una sola centralina) e misuro in quella centralina l'altezza di marea a intervalli regolari predefiniti; o ancora fisso un'altezza di marea, quella per cui per es. Piazza San Marco va sott'acqua, ammettiamo 80 cm e registro l'ora e giorno in cui le varie centraline raggiungono quel valore.

Nei tre casi abbiamo: nel primo, tempo fissato, spazio controllato, altezza misurata; nel secondo, spazio fissato, tempo controllato, tema misurato; nel terzo, tema fissato, spazio controllato, tempo misurato.

La carta e il Gis, in quanto applicativo che gestisce in modo numerico la carta seguono lo schema tempo fisso, tema controllato, spazio misurato, come detto precedentemente. Alla rappresentazione del dato qualità dell'acqua, nel suo aspetto dinamico, meglio si addice il secondo schema tra quelli appena esemplificati, che ci impedisce però di ragionare sullo spazio (lagunare). Infatti lo spazio è fisso. Una soluzione per recuperare la dimensione spaziale è quella di fissare il tempo, discretizzare lo spazio in celle e fornire una mappa dei valori dell'inquinamento a una data prefissata. Ed è su questo schema che lavorano i modelli di simulazione dei fenomeni dinamici che sono stati utilizzati nel nostro prototipo che descriveremo qui di seguito.

Questa digressione concettuale dovrebbe permettere di capire meglio una serie di aspetti progettuali del prototipo, in particolare: che è necessario trovare l'ambiente di lavoro (modelli e algoritmi, applicativi e *set* di programmi) adatto ad ogni *measurament framework* e quindi la necessità di ambienti di lavoro separati. Inoltre, come si vedrà i protocolli di interscambio intervengono nel trasformare lo spazio continuo del Gis in quello discretizzato dei modelli di simulazione (*raster*).

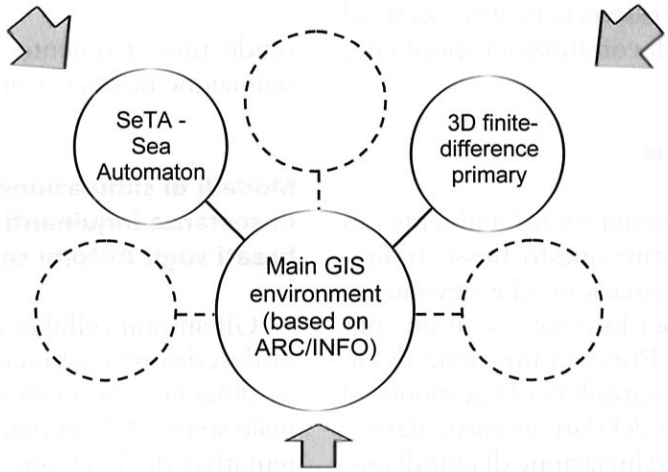
Gli elementi dell'architettura modulare

Come già detto sopra, la soluzione adottata per gestire in un unico sistema dati statici e dinamici, si basa su una struttura modulare (Fig.1) composta dai seguenti elementi:

1. Un ambiente Gis principale — basato sul pacchetto *software* Arc/Info e personalizzato con l'ausilio dell'Arc/Info Macro Language (AML), di piccoli programmi scritti in C/C++ e di scripts per la Bourne Shell di UNIX — con la funzione di perno attorno al quale si articola una serie di estensioni modulari e di organizzatore dell'informazione geospaziale.
2. Un ambiente di lavoro, programmato in Prolog per piattaforme Microsoft Windows, per la gestione dell'Automa [Cellulare] per le Trasformazioni del Mare (SeTA)". Questo ambiente si presenta come applicazione *stand-alone* e consente, impiegando la tecnica dell'automa cellulare (analisi delle proprietà degli intorni di celle e la loro trasformazione in un'unità di tempo in base a determinate regole), di produrre delle simulazioni sull'evolversi dello stato complessivo delle acque della Laguna Veneta.
3. Un ambiente di lavoro, programmato in Fortran per UNIX, per la gestione di un Modello Tridimensionale a Dif-

Sea Transformation Cellular Automaton (SeTA).
Usato per analizzare la diffusione dell'inquinamento e la sua interazione con la vegetazione.

The primary production model
Simula l'evoluzione spazio-temporale delle concentrazioni di macronutrienti e delle comunità fitoplantoniche e fitobentoniche.



L'ambiente Gis principale — basato sul software Arc/Info — è il nucleo centrale, cui sono connesse le estensioni modulari. Il Gis agisce come "manager" dell'informazione spaziale e produce gli *output* grafici.

FIGURA 1 – *L'architettura modulare del Gis integrato.*

ferenze Finite dell'Eutrofizzazione della Qualità dell'Acqua nella Laguna Veneta. Questa implementazione del modello consente di produrre delle simulazioni dell'evolversi delle concentrazioni di sostanze responsabili del fenomeno dell'eutrofizzazione e della crescita di macroalghe.

4. Un'interfaccia utente a riga di comando, basata sull'interfaccia utente di Arc/Info personalizzata con le tecniche descritte sopra, con il compito di agevolare le operazioni di interrogazione delle simulazioni prodotte dall'automa e dal modello e ponderate con l'ausilio di analisi incrociate tra simulazioni e altri dati presenti nel Gis.

La peculiarità di questo prototipo risiede sull'opzione di integrare le potenzialità prevalentemente di natura spazia-

le di un Gis con le potenzialità della modellistica di fenomeni dinamici.

L'integrazione tra i due ambienti di lavoro periferici e quello principale è stata realizzata tramite il principio della condivisione dei dati, mentre il modulo principale condivide con l'interfaccia utente le procedure.

Questa struttura è stata concepita in modo da poter essere, in futuro, esteso ad ulteriori moduli con funzioni specifiche.

L'ambiente Gis

Il Gis si presenta come l'ambiente più adatto per gestire questo flusso bidirezionale di informazioni, che devono essere inserite, per loro natura, in un contesto spaziale. Presenta una serie di caratteristiche essenziali per la gestione e il processamento dei dati, in particolare:

- capacità di archiviazione di grandi moli di dati descritti con esaustività nella loro componente spaziale;
- interrogazione spaziale, e non, sulla presenza, localizzazione e caratteristiche degli oggetti territoriali;
- interazione con l'utente per la formulazione di *queries*, elaborazione di dati, spaziali e non, accessibilità al *database*.

Oltre queste caratteristiche relative alla gestione ed elaborazione dei dati spaziali digitali, il Gis contempla tutta una serie di funzioni di visualizzazione e di stampa attraverso le quali è possibile produrre cartografia. La grande possibilità di scelta dell'informazione geografica da rappresentare e di tutte le possibili combinazioni di *layer* sovrapponibili lo rende uno strumento di multi-rappresentazione molto versatile.

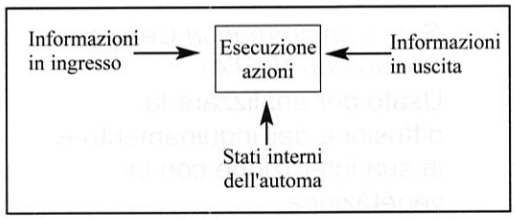


FIGURA 2 – *Schema di funzionamento di un automa.*

Modelli di simulazione di dispersione di sostanze inquinanti in laguna basati sugli Automi cellulari

Gli automi cellulari sono una tecnica di descrizione e simulazione di fenomeni dinamici che evolvono nel tempo e nello spazio. Gli automi costituiscono un tentativo di descrivere le dinamiche di sviluppo di un fenomeno in una forma più «naturale», attraverso una formulazione «locale» contrapposta alla tradizionale formulazione «globale» dei modelli basati su sistemi di equazioni.

Un automa (Fig.2) può essere così formalizzato:

- un insieme di informazioni in **ingresso**;
- un insieme di informazioni o comportamenti in **uscita**;
- un insieme di **stati interni**.

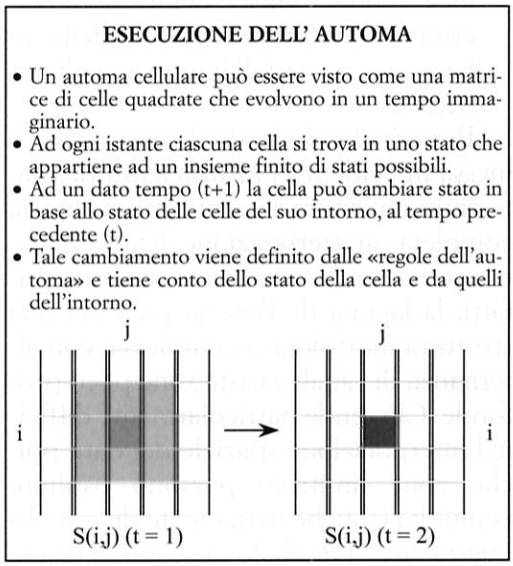
Le **regole** stabiliscono le relazioni tra ingressi, stati interni e uscite.

Nel nostro caso si tratta di simulare la variazione di concentrazione di una sostanza (ad esempio la salinità) o di una specie vegetativa nel tempo, attraverso la relazione con altri fattori, quali

la velocità dell'acqua e la morfologia del bacino. L'esecuzione di un modello (automa cellulare) di questo tipo consiste nella trasformazione di uno scenario di concentrazione di sostanza per opera delle regole di trasformazione, per un dato numero di cicli – o passi – e nella visualizzazione tramite una opportuna interfaccia grafica di tale trasformazione. L'analisi dei complessi fenomeni che intervengono nella dinamica lagunare ha portato a individuare tre tipi di fenomeni modellizzati con tre diversi automi.

- Il primo tipo di modelli riguarda la **dispersione di sostanze** (avvezione o diffusione) in un bacino ad opera dell'idrodinamica. I modelli si basano sostanzialmente su formule di bilancio tra le celle per determinare le variazioni di concentrazione della sostanza. La scala temporale di studio del fenomeno è quella giornaliera.
- Un secondo tipo riguarda **fenomeni di interazione** tra sostanze inquinanti e la vegetazione presente nel bacino lagunare. In questo caso fattori importanti nella modellazione del fenomeno sono il rilascio ed assorbimento di sostanza da parte della vegetazione, che vengono trattati con un approccio stocastico-euristico. La scala temporale di studio ed evoluzione del fenomeno e' qui stagionale (cioè una simulazione si intende riferita ad un arco temporale di uno o più mesi).
- Un terzo tipo riguarda fenomeni di **interazione spaziale** tra gli elementi del sedimento, dell'acqua e dell'aria. In questo caso vengono simulati alcuni dei processi di scambio e trasformazione di sostanze organiche ed inorganiche tra gli elementi, nella zona che va dal sedimento all'atmosfera (cioè la colonna verticale sedimento-acqua-atmosfera). Anche qui la scala temporale di studio ed evoluzione del fenomeno e' stagionale.

FIGURA 3 – *Esecuzione dell'automa.*



Questo lavoro ha comportato in una prima fase la formalizzazione teorica dei tre tipi di modelli, definendone tutte le componenti in gioco e i tipi di interazione; in una seconda fase sono stati sviluppati ed utilizzati i programmi necessari alla implementazione di questi modelli: SeTA (*Sea in Transformation Automaton*).

SeTA è stato interfacciato con il sistema Gis (Arc/Info) mediante la scrittura di un apposito modulo di conversione dei dati tra i due sistemi.

Il Gis fornisce infatti le informazioni

iniziali alle simulazioni degli automi; una volta effettuata la simulazione i suoi risultati (in formato numerico o grafico) possono diventare nuovi dati disponibili dell'applicazione Gis, ed essere utilizzati in diversi modi.

Modello tridimensionale alle differenze finite di produttività primaria della Laguna di Venezia

Il modello di simulazione opera nell'ambito della qualità ambientale ed è stato sviluppato presso il Dipartimento di Chimica Fisica dell'Università di Venezia (Dejak e Pecenik, 1987). E' stato progettato ai fini del controllo del livello trofico della Laguna e la gestione delle immissioni di nutrienti e segue l'evoluzione stagionale delle due principali di comunità di produttori primari, quella fitoplanctonica e quella fitobentonica, nella parte centrale delle laguna di Venezia. Tale evoluzione dipende dalla radiazione solare incidente, dalla temperatura dell'acqua e dalla concentrazione di macronutrienti, azoto e fosforo: per questo motivo, è necessario descrivere la dinamica di quindici variabili di stato (Fig. 4) (Solidoro et al., 1997).

Ne risulta un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali, che viene discretizzato secondo uno schema alle differenze finite. Il flusso tra le celle del reticolo è esclusivamente diffusivo: la costante di diffusività comprende però gli effetti dell'agitazione mareale e varia nello spazio in accordo con le caratteristiche idrodinamiche del sito.

Il modello matematico, alle differenze finite, segue l'evoluzione del sistema nello spazio e nel tempo. Nello spazio, la discretizzazione della batimetria lagunare è alquanto accurata, poiché viene usato un passo spaziale orizzontale di 100 metri ed uno verticale di 1 metro. Nel tempo, viene adottato un passo di integrazione di un'ora, che consente di seguire il ciclo giornaliero della fotosintesi.

Il lavoro si è articolato nelle seguenti quattro fasi:

a) esame della tipologia di dati riguardanti i macronutrienti e la densità di produttori primari, planctonici e bentonici, attualmente reperibili presso le banche dati del Consorzio Venezia Nuova (CVN) e della Regione Veneto;
b) estensione all'intero bacino dell'area modellata;
c) definizione dei protocolli per il trasferimento dei dati dal modello al Gis e viceversa;
d) visualizzazione degli scenari evolutivi annuali della produzione fitoplanctonica, fitobentonica e dei livelli di macronutrienti previsti dal modello in base a tre scenari di immissione di nutrienti.

Per ciò che riguarda il punto a), si è messa in evidenza l'insufficienza dei dati puntuali sinora reperiti ai fini di una completa caratterizzazione dell'evoluzione spazio-temporale dell'ecosistema. Infatti, la laguna di Venezia presenta una struttura morfologica complessa, con alternanza di canali e vaste zone poco profonde. Ciò rende particolarmente difficile l'interpolazione spaziale dei dati, poiché zone limitrofe possono ospitare comunità trofiche nettamente diverse. In questa fase, il modello può quindi essere

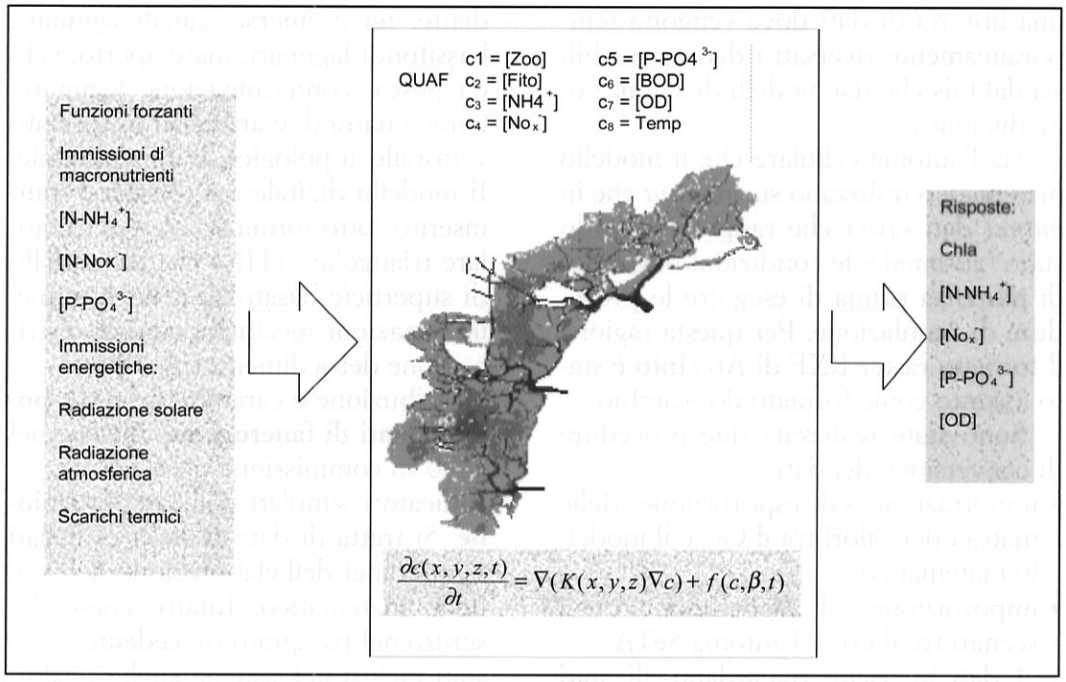


FIGURA 4 – *Funzionamento del modello tridimensionale.*

utilizzato sia per integrare le informazioni puntuali esistenti che per prospettare possibili scenari relativi ad interventi di ripristino.

Per questa ragione, l'area modellata è stata estesa a tutto il bacino lagunare (punto b), mettendo a punto una serie di procedure che permettono l'interscambio dei dati tra ambiente Gis e il modello. Il GIS può infatti essere utilizzato per fornire al modello, ad es. la localizzazione delle immissione di macronutrienti, mentre il modello può fornire al Gis mappe di macronutrienti o di altri indicatori di qualità dell'acqua, come l'Ossigeno Disciolto.

A causa dei tempi di calcolo ancora piuttosto elevati richiesti dal modello, non è pensabile interagire in tempo reale con esso. Si è quindi ricorso alla definizione di scenari di immissioni, costruendo una opportuna libreria di mappe tematiche, (medie annuali, stagionali, valori critici) relative a ciascuno scenario che possono essere richieste dall'utente e sovrapposte con informazioni di altra natura.

L'interfaccia di scambio

La comunicazione tra i vari moduli si basa sul principio della condivisione dei dati realizzata tramite una interfaccia di scambio che comprende delle specifiche procedure per la conversione dei dati e

una libreria di dati dove vengono temporaneamente riversati i dati accessibili sia dal Gis che dai modelli di simulazione dinamica.

Sia l'automa cellulare che il modello matematico utilizzano sia in *input* che in *output* dati *raster* che rappresentano lo stato (automa) e le condizioni (modello) di partenza prima di eseguire le procedure di simulazione. Per questa ragione il formato raster RXF di Arc/Info è stato assunto come formato do scambio.

Sono state realizzate due procedure di conversione dei dati:

- importazione ed esportazione delle matrici dei valori tra il Gis e il modello matematico
- importazione ed esportazione degli scenari tra il Gis e l'automa SeTA.

I dati in uscita riguardano gli **stati** finali delle celle (automa) e le **concentrazioni** di sostanze che caratterizzano l'eutrofizzazione dell'ambiente lagunare (modello). Questi dati costituiscono poi una libreria delle simulazioni nel modulo principale.

Aspetti cartografici

Nel Gis vanno quindi a confluire gli scenari dello stato dell'inquinamento a una certa data provenienti dai modelli di simulazione. E questo potrebbe essere realizzato in tempo reale, una volta superati alcuni problemi di tempo di calcolo. Tempo reale rispetto a una richiesta dell'utente.

Nel Gis si trovano inoltre una serie di banche dati spaziali tra cui:

- La **morfologia** della Laguna comprendente: terre emerse, canali lagunari, bassifondi lagunari, mare aperto, valli da pesca, conterminazione lagunare, barene naturali e artificiali in formato vettoriale topologico bidimensionale. Il modello digitale dei fondali è stato inserito sotto forma sia di rete irregolare triangolare (TIN) che di modello di superficie basato su celle e, infine, informazioni specifiche quali la distribuzione dei sedimenti superficiali.
- Distribuzione e caratteristiche dei **popolamenti di fanerogame**, rilevate nel 1990 su commissione del CVN.
- Indicatori simulati dell'**eutrofizzazione**. Si tratta di dati di *input* o di dati temporanei dell'elaborazione del modello matematico. Infatti, come descritto nel paragrafo precedente, sono stati inclusi nel sistema anche i valori delle concentrazioni di azoto, ossigeno, fosforo, fitoplancton, temperatura e ulva simulate a diverse profondità con tre diversi carichi di nutrienti iniziali e archiviate in passaggi temporali di quindici giorni per un periodo complessivo che va dal 90° al 285° giorno dalla data d'inizio della simulazione.

Oltre a questi si sarebbero potuti introdurre dati relativi alle arginature, toponimi, ecc. tutto ciò che è materializzato permanentemente nella Laguna di Venezia e che ne restituisce la sua immagine «statica».

Se riflettiamo sulla distinzione dati statici e dati dinamici, seppur fermati ad un certo istante, possiamo trovare una analogia con la distinzione fondo cartografico e dati tematici. Una analogia ancora più forte se pensiamo alla loro funzione: il fondo cartografico serve di sup-

porto, ma soprattutto di contesto geografico all'informazione tematica. La scelta del fondo cartografico deve trovare un equilibrio tra la necessità di non ingombrare troppo la lettura-comunicazione dell'informazione tematica, e quella di dare significato, attraverso le relazioni spaziali tra diversi fenomeni geografici, all'informazione tematica.

Un sistema integrato così concepito ha quindi in sé tutti i requisiti di una «bottega del cartografo» nella quale si trova tutta la documentazione di ciò che è conosciuto su quel territorio cosicché secondo le necessità e le finalità il cartografo va a prendersi nel suo archivio questi documenti (database) che gli servono per allestire la sua carta.

Questa ricerca viene poi facilitata in quanto l'utente-cartografo può formulare un'interrogazione sia ai dati del Gis sia alla libreria delle simulazioni in modo da ottenere risposta a quesiti riguardanti situazioni ambientali particolari. Il ruolo del Gis come interfaccia all'intero sistema consente una visione unitaria senza avere conoscenze sugli specifici moduli. Questa condizione lascia spazio allo sviluppo di strumenti di diffusione e ricerca come interfacce web o strutture di metadati che facilitano la consultazione degli archivi di dati.

L'analogia con la bottega del cartografo, fa comunque riflettere su alcune pratiche che tuttavisa il Gis non assolve: ovvero quelle specifiche del mestiere del cartografo che una volta definiti i dati, quelli del fondo cartografico e dei tematismi, deve decidere i segni con cui rappresentarli e risolvere i conflitti grafici che si pongono quando questi segni vengono piazzati sul piano cartografico. E questo lo fa facendo prove e riprove, o alla lunga costruendosi una serie di fondi cartografici con diverse caratteristiche che l'esperienza gli ha mostrato essere utili.

Quindi, un sistema integrato di vari moduli sul principio dell'interoperabilità e la centralità del Gis come interfaccia all'intero sistema, resta una condizione necessaria per costruire questa nuova bottega del cartografo, ma è necessario predisporre alcuni prototipi di cartografia (database cartografici) se si vuole non solo mappare ma produrre carte.

Nota: la ricerca MURST- Sistema Lagunare Veneziano qui esposta è stata condotta da una equipe composta da: A. Bianchin (responsabile scientifico), M. Hedorfer (Gis), R. Pastres (modelli matematici), E. Rinaldi (automi cellulari), D. Schiuma (analisi dei dati).

Bibliografia

ALBA S., (1997), *Applicazione degli automi cellulari per l'analisi territoriale e ambientale: ipotesi di uso in un Gis per aree marino-costiere*. Tesi di Laurea, DAEST-IUAV.

BERGAMASCO A., PIOLA S., DELIGIOS M., (1996), Model Oriented Gis for Marine and Coastal Environmental Applications, *Geographical Information, From Research to Application through Cooperation*, vol. I, Oxford.

BERTIN J., (1981), *La grafica e il trattamento grafico dell'informazione*, ERI, Torino.

BERTIN J., (1967), *Sémiologie graphique*, Mouton /Gauthier- Villars, Paris.

BESUSSI, E. and CECCHINI, A. (eds) (1997), *Artifical Worlds and Urban Studies*, DAEST, Venezia.

Bianchin A., Bergamasco A., Rinaldi E., (1998),

Modelling dispersion phenomena in tidal environments: use of cellular automata in Gis applications, *Gis technologies and their environmental applications*, Computational Mechanism Publications, Southampton.

COUCLELIS H., (1985), Cellular Worlds: A Framework for Modeling Micro-Macro Dynamics, *Environment and Planning A*, 28, 99-109.

CHRISMAN N., (1996), *Exploring Geographic Information System*, Wiley & Sons.

DEJAK C. and PECENIK G., (1987), Special issue: Venice lagoon, *Ecological Modelling*, 37, 1-101.

C. SOLIDORO, V.E. BRANDO, D. FRANCO, R. PASTRES, G. PECENIK and C. DEJAK, (1997), Simulation of the seasonal evolution of macroalgae in the lagoon of Venice, *Environmental Modelling & Assessment* 2 , 65-71.

SUCCI S., (1990), *Automi Cellulari*, F. Angeli, Milano.

TOBLER W. R., (1979), Cellular geography, in S. GALE, G. OLSSON (editors), *Philosophy in geography*, Reidel, Dordrecht.

TOFFOLI T., MARGOLUS N., (1987), *Cellular Automata Machines: A new Environment for Modeling*, The MIT Press, Boston.

WAGNER D.F., (1997), Cellular Automata and Geographic Information Systems, *Environment and Planning B*, 24(2), 219-234.