

GIS, DBMS e modelli predittivi per il monitoraggio e la pianificazione ambientale

Introduzione

Costruire modelli predittivi su base territoriale significa valorizzare basi dati eterogenee integrandole in un Sistema Informativo Geografico (GIS) per definire funzioni di protezione ambientale (funzioni di rischio ecologico ed antropico) o di gestione territoriale (mappe di sensibilità o di vocazione) che siano valide su dati futuri generalizzando dai dati disponibili. La nuova prospettiva è quella di considerare un sistema in cui basi di dati, mappe digitali, immagini e flussi di informazioni territoriali siano integrati fra loro per costruire metodi di monitoraggio e modelli numerici di cui si garantisce l'aggiornamento continuo. Il cuore di questi modelli è un ambiente che potremmo chiamare GIS-DBMS (fig. 1), nel senso di un'estensione di un classico sistema di gestione dei dati (DBMS) con le funzioni di un GIS. Obiettivo di questo lavoro è mostrare come si possano costruire nuove applicazioni per la gestione ambientale e territoriale introducendo in un sistema GIS-DBMS tecnologie software sufficientemente evolute. Tratteremo in particolare di modelli per il monitoraggio e la pianificazione in cui sono stati introdotti strumenti per accelerare l'aggiornamento dei dati: l'obiettivo è quello di trasferire precocemente questa metodologia dal mondo della ricerca a quello della gestione.

Di per sé la novità dei GIS-DBMS potrebbe apparire poco evidente, visto che la gestione integrata di dati a riferimento geografico ha sempre costituito il motivo dello sviluppo dei sistemi informativi territoriali da parte di organizzazioni militari e civili: come esempi in tutti i sensi distanti fra loro potremmo citare un sistema software quale GRASS (Geographic Resource Analysis Support System) del CERL, organismo di ricerca militare USA, e la rete di stazioni che costituiscono il Sistema Informativo Ambiente e Territorio (SIAT) della Provincia Autonoma di Trento.

Nella realtà è risultato molto impegnativo mantenere collegati gli strumenti di descrizione geografica a quelli di gestione delle informazioni e soprattutto a quelli di supporto alla decisione, mentre proprio quest'ultimo è l'aspetto molto più interessante della pur utile gestione di cartografie digitali. Si è trattato probabilmente di un contemporaneo problema di tecnologie e di dati: il livello di infrastruttura tecnologica necessario solo pochi anni fa (es. una *workstation* RISC dotata di sistemi ARC/INFO e ORACLE) era alla portata di grandi organizzazioni, lasciando poco più della visualizzazione di cartografia digitale agli altri utenti. Nella primavera del 1997 è stato possibile mostrare la possibilità di costruire funzioni GIS complesse e mappe predittive (MERLER *et al.*, 1996; FURLANEL-

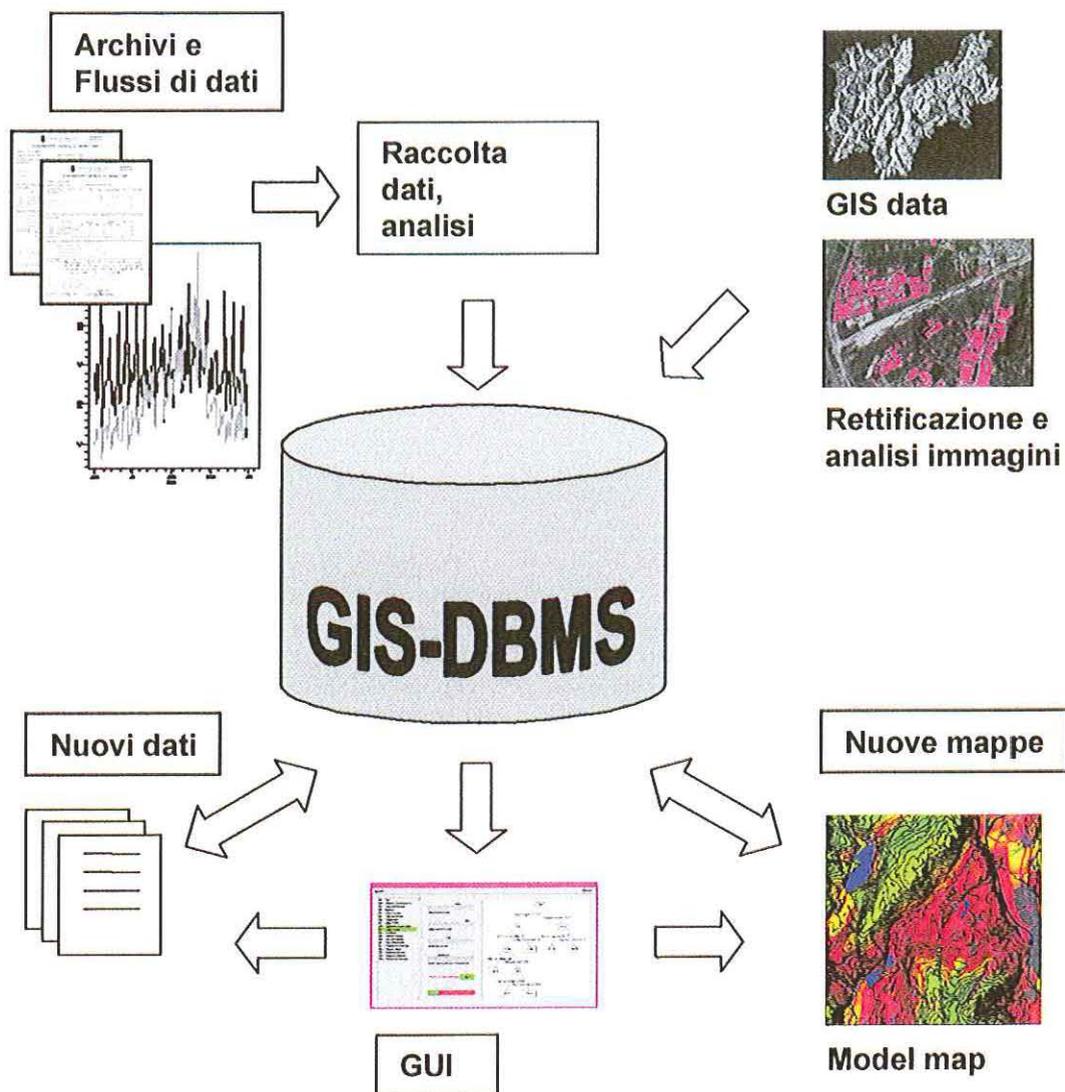


Fig. 1 - Componenti e relazioni di un sistema GIS-DBMS.

LO *et al.*, 1997) da dati del SIAT, e in particolare dalle basi dati forestali opportunamente rielaborate, utilizzando un *home computer* dotato di sistema operativo Linux e il GIS GRASS. D'altra parte, situazioni di complessità e forte variabilità territoriale (ad esempio in ambiente alpino), o semplicemente la necessità di interventi a piccola scala, richiedono un livello di dettaglio ele-

vato del dato: in Trentino, la disponibilità del modello digitale del terreno (DTM) passo 10 metri è una conquista recente ed ha aperto un capitolo nuovo nella ricerca rendendo possibile creare modelli di pendenza ed esposizione finalmente credibili nelle applicazioni.

Per quello che riguarda la raccolta dei dati necessari alla gestione territoriale, a

meno di non banalizzare l'analisi, è importante poter controllare nel tempo le modifiche in atto e i risultati funzionali che ne conseguono (per esempio nelle situazioni di interfaccia tra bosco, prati e mugheta). È perciò cruciale disporre di descrizioni sufficientemente precise ed aggiornate: d'altra parte, ricavi e costi del monitoraggio dipendono direttamente dall'impegno e dalla continuità del monitoraggio realizzato, e già il rilievo a terra ha costi difficili da sostenere per gli obiettivi primari di protezione e produzione finora perseguiti.

Riassumendo, si rischia di lavorare con basi dati statiche e a risoluzioni non adeguate: un modello su GIS diviene una fotografia magari poco precisa della situazione corrente e utilizzabile solo in parte per la pianificazione.

È invece possibile arricchire le risorse di dati e cartografia con oggetti GIS creati tramite classificazione automatica da remote sensing (RICHARDS, 1993) ad esempio estraendo elementi di vegetazione o manufatti da foto aeree o dati satellitari. La restituzione automatica o semiautomatica della cartografia da aereofotogrammetria è probabilmente l'unica soluzione fattibile in situazioni dinamiche (es. nel monitoraggio di aree a canneto) ed apre prospettive molto interessanti quali il calcolo di indicatori di ecologia del paesaggio (INGEGNOLI, 1993), come vedremo più avanti. Inoltre, sono disponibili o possono essere appositamente realizzate funzioni GIS per costruire nuove variabili territoriali che abbiano valore riassuntivo (es. strutture di habitat) o per introdurre nuove misure (es. distanze tra siti di monitoraggio). In molte situazioni, lo sforzo di raccolta di dati al suolo può essere ridotto da procedure di stima, o meglio, di generalizzazione. La generalizzazione può essere indotta sia a livello di variabili misurate che a quello della funzione territoriale che si vuole realizzare, e lo sforzo di campionamento può essere ridotto pianificando tramite design sperimentale guidato da funzioni GIS la scelta dei siti o delle aree di monitoraggio (v. esempio più avanti).

Il punto chiave è comunque l'integrazione dei metodi GIS con le basi dati esistenti,

sia quelle statiche, corrispondenti a tematismi GIS stabilizzati (es. il tematismo genesi prodotto dal Servizio Geologico) che soprattutto quelle ricavabili da metodologie standard di monitoraggio in cui venga informatizzata la procedura di trasferimento e condivisione dei dati. Sono ora disponibili sia soluzioni commerciali che "open software" (software distribuito gratuitamente in accordo ad una licenza d'uso e di modifica) per la realizzazione delle procedure informatiche di integrazione: per i risultati descritti in questo lavoro sono stati utilizzati, oltre al GIS GRASS, il linguaggio per la manipolazione dati Perl, il gestore di basi dati relazionali PostgreSQL, e TclTk quale linguaggio per la realizzazione di interfacce utente (o GUI). Per l'analisi dei dati abbiamo invece utilizzato S-Plus, un ambiente per la statistica computazionale con funzionalità per l'esplorazione grafica.

Gli sviluppi più recenti delle attività di integrazione riguardano la possibilità, attualmente in sperimentazione, di garantire via internet l'aggiornamento continuo, l'apporto degli esperti e la condivisione dei risultati dei modelli. Questo approccio permette di utilizzare interfacce indipendenti dalle architetture hardware e software grazie all'utilizzo dei *browser* ormai comuni su ogni stazione di lavoro ed estendere quindi l'applicabilità dei modelli sviluppati. Un esempio sperimentale sarà descritto nella parte finale di questo lavoro.

Metodi per la pianificazione della gestione del patrimonio faunistico in Trentino

In collaborazione con il Servizio Faunistico della Provincia di Trento, è stato sviluppato un modello sperimentale per valutare e predire la risposta delle popolazioni di capriolo agli interventi di prelievo nelle riserve del Trentino. La metodologia sviluppata è basata su modelli predittivi di consistenza e sul calcolo di un modello numerico dell'habitat del capriolo realizzato in ambiente GIS. L'integrazione dei dati di

assestamento forestale (dal Servizio Foreste) e del piano urbanistico provinciale (dall'Ufficio Urbanistica e Tutela del Paesaggio) ha permesso di realizzare un tematismo base per la realizzazione di modelli ambientali di interesse faunistico (Fig. 2), da cui è stato quindi ricavato un modello specifico per il capriolo tramite lo sviluppo di procedure GIS. Il principale risultato ottenuto è un modello predittivo, dotato di interfaccia utente, per la stima della densità di prelievo basato su serie storiche di dati.

Danni da ungulati alla rinnovazione forestale

In collaborazione con il Servizio Foreste della Provincia di Trento, è in corso di studio un metodo per la stima dei danni da ungulati alla rinnovazione forestale basato su di una rete di stazioni di monitoraggio a basso costo e ben distribuite sul territorio provinciale. La metodologia prevede l'installazione di gabbie a protezione della rinnovazione a livello di semenzale ed il monitoraggio del danno ai semenzali e alle

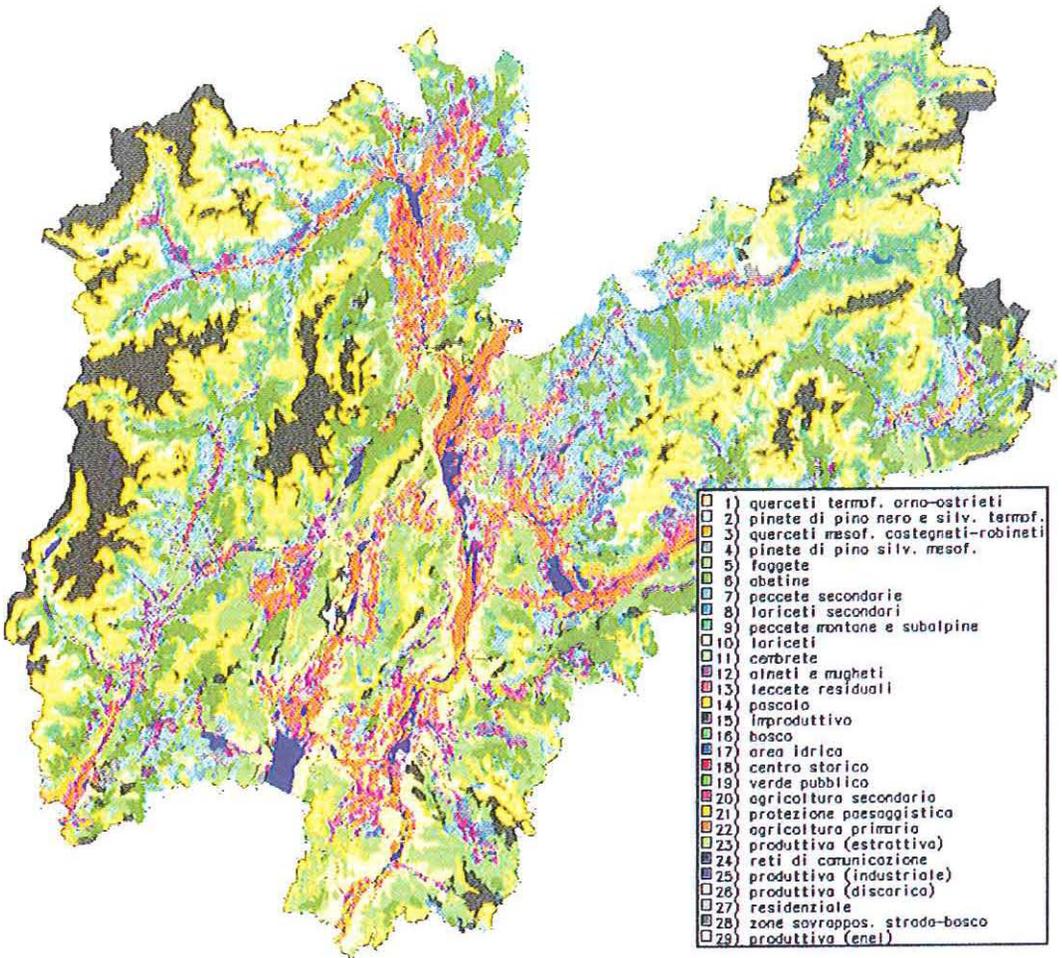


Fig. 2 - Mappa digitale hab_base: la mappa è generata integrando dati di assestamento forestale e dati del piano urbanistico provinciale relativi all'uso del suolo. La mappa, unitamente al modello digitale del terreno e ad ipotesi comportamentali della specie, consente la definizione del modello numerico dell'habitat del capriolo.

piantine in aree prossime alle gabbie. Il disegno sperimentale del progetto (DIAMOND, 1989) è stato basato sull'analisi di dati GIS da tematismi del SIAT in integrazione a quelli di assestamento forestale e prevede di individuare le zone di campionamento in modo da coprire uniformemente le varie classi combinate di altitudine, pendenza, esposizione presenti all'interno delle zone boscate di ogni stazione forestale. L'utilizzo del DTM ai 10 metri ha permesso di calcolare con la necessaria precisione le classi entro cui effettuare i campionamenti (fig. 3);

design sperimentale e analisi dei dati sono stati eseguiti utilizzando algoritmi statistici in ambiente S-Plus.

Metodi software per il monitoraggio del valore ambientale

Il progetto è dedicato allo sviluppo di strumenti software per il monitoraggio e la pianificazione delle operazioni di miglioramento ambientale rivolte al ripristino di

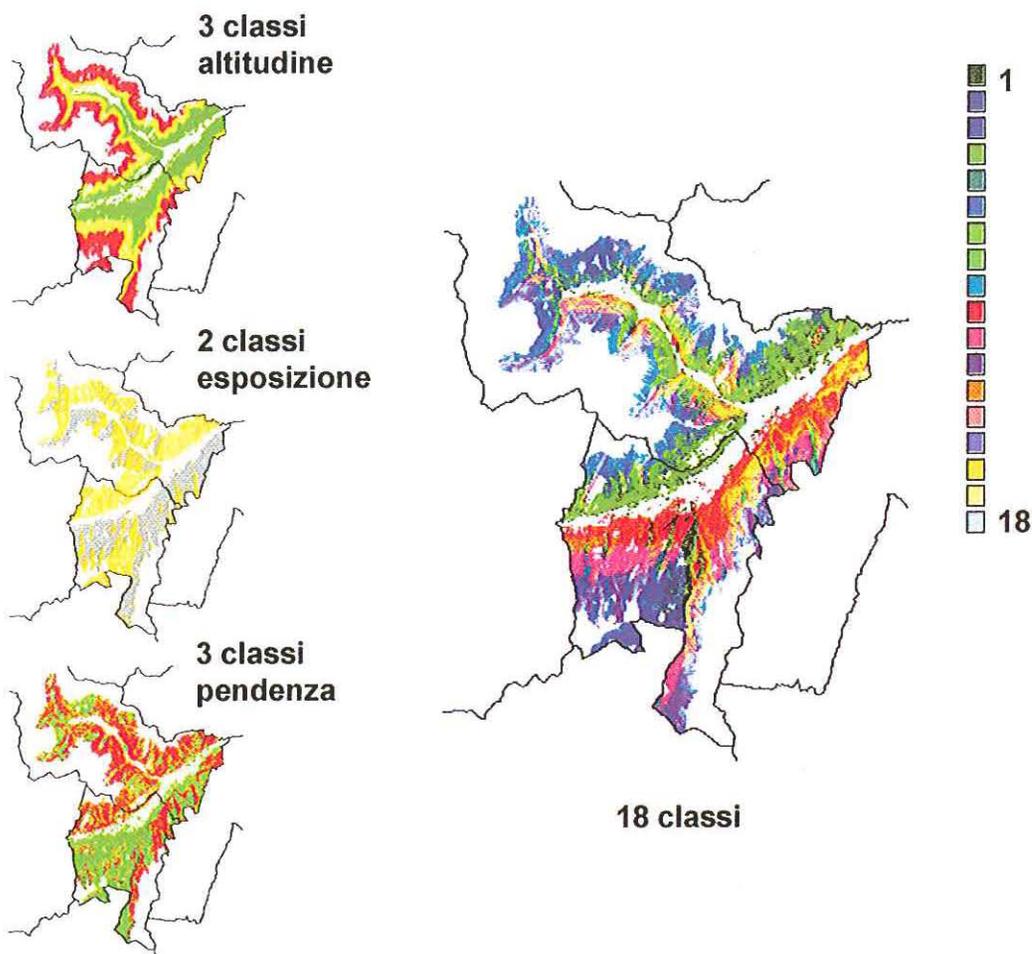
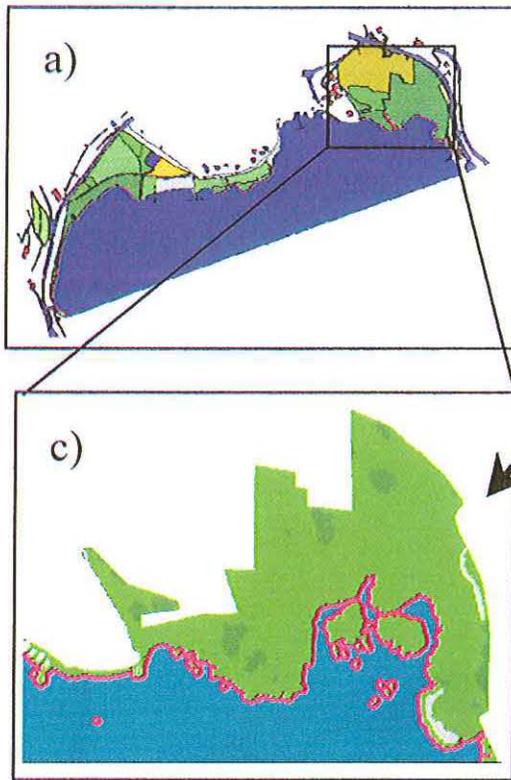
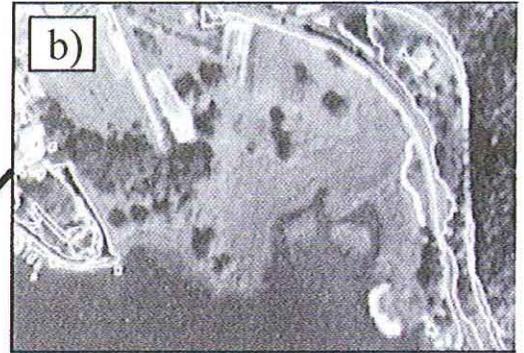


Fig. 3 - Nella figura a destra è rappresentata la classificazione del territorio boscato (ceduo e fustaia) delle stazioni forestali di Dimaro e Malè suddiviso in diciotto classi ottenute dalla combinazione delle tre classi di altitudine, delle due di esposizione e delle tre di pendenza rappresentate nelle tre immagini a sinistra. Nel territorio appartenente a ciascuna classe vengono collocati un egual numero di punti di campionamento distribuiti in modo uniforme sull'area occupata dalla classe.



**calcolo dell'interfaccia
lago-canneto**



**Area interfaccia (mq):
cartografia PAT: 1381
class. da OFD 94: 3200**

Fig. 4 - Impiego di foto aeree per l'aggiornamento di mappe tematiche. La zona rappresentata è relativa al biotopo di S. Cristoforo (Trento). L'immagine a) è la carta tematica del biotopo ottenuta da misure sul campo; l'immagine b) è una foto aerea (ortofoto del Volo Italia 1994) della zona successiva alle misure e ad interventi di gestione. Da essa attraverso un algoritmo di classificazione automatica vengono individuate le classi "lago" e "canneto" e quindi l'interfaccia tra le due.

condizioni favorevoli allo sviluppo ed alla tutela della fauna selvatica. Il sistema software è in corso di sviluppo in collaborazione con il Servizio Faunistico; si vuole integrare in modo sistematico basi dati georeferenziate, procedure di classificazione da foto aeree, indicatori di analisi della qualità ambientale e metodi GIS che implementino indicatori ambientali. In fig. 4 si può osservare come l'utilizzo di tecniche di classificazione di foto aeree si renda indispensabile in tali applicazioni, essendo talvolta poco rappresentativa della situazione attuale la cartografia digitale disponibile. Inoltre, sono stati sviluppati moduli GIS per applicazioni di ecologia del paesaggio (fig. 5 e tab. 1), che consentono il calcolo di indici numerici quali dimensioni e forma

dei patch di bosco e grado di frammentazione degli ecotoni (PEITGEN et al., 1992).

Informatizzazione e cartografia dei dati degli investimenti stradali di ungulati in Trentino

I dati sistematicamente raccolti dal Servizio Faunistico relativi agli investimenti stradali di ungulati, sono stati utilizzati all'interno di un sistema GIS per la realizzazione di una mappa digitale delle zone più sensibili agli investimenti faunistici, allo scopo di valutare possibili interventi di attenuazione del rischio investimento e, in fase di pianificazione, stimare l'impatto

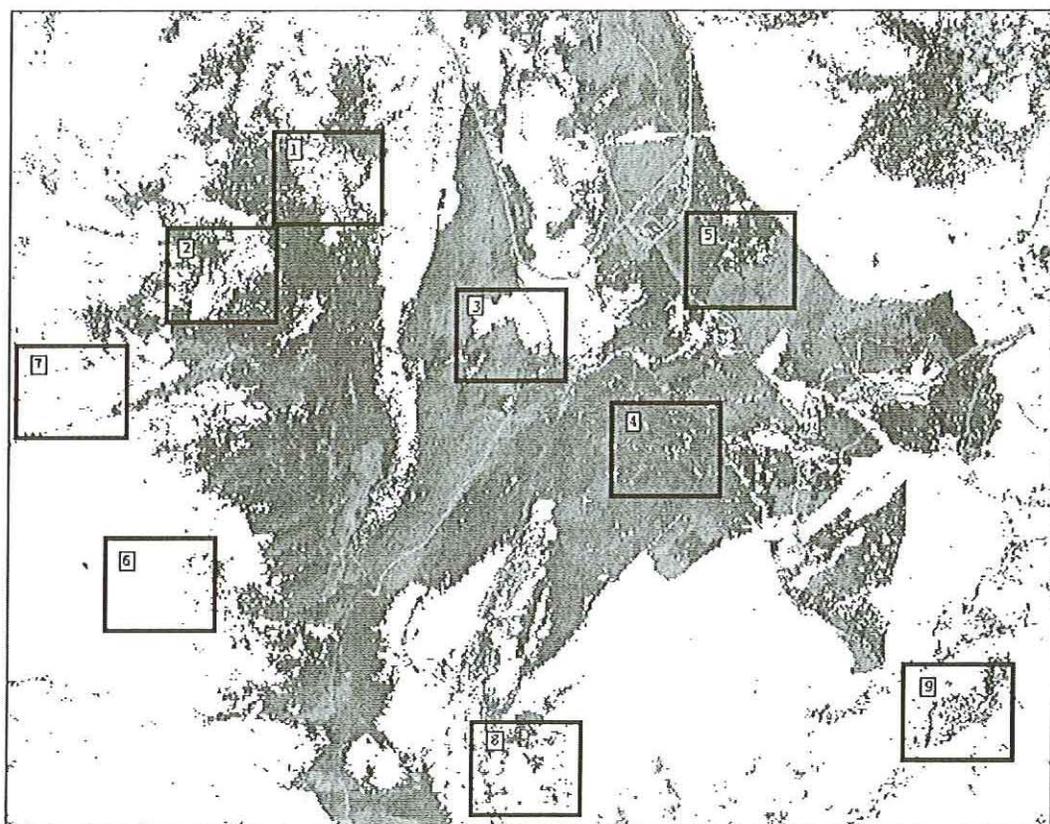


Fig. 5 - Esempio di analisi per il miglioramento ambientale. Nella ortofoto è rappresentata una zona del Monte Bondone (Trento) di estensione 4372m 3371m. Su di essa la porzione bianca rappresenta l'area boscata che è stata individuata in modo automatico mediante l'applicazione di un algoritmo di classificazione. In particolare sono evidenziate 9 aree (di estensione 458m 385m) all'interno delle quali si sono riconosciute le zone di bosco (patch) su cui si sono effettuate le opportune misure: dimensioni e forma dei patch, relazioni tra patch vicini e loro distribuzione spaziale (i dati relativi sono riportati in Tabella 1).

Tab. 1 - Delle nove aree di campionamento individuate sulla ortofoto della figura 5 sono riportati i seguenti dati: numero di patch, *Cop.* percentuale di copertura di area boscata, P_{tot} perimetro totale dell'area boscata, $\mu(P/A)$ media del rapporto tra perimetro ed area dell'area boscata per patch, $\mu(PC/A)$ indice medio di forma dei patch (1 per forme circolari, ∞ per forme infinitamente allungate), $\mu(RCC)$ indice medio di compattezza dei patch (0 per forme poco compatte e 1 per forme circolari) e $\mu(d_p)$ indice medio di porosità espresso attraverso il valore medio della distanza tra i patch e l'immediato vicino.

area	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n°patch	176	192	39	73	132	1	4	34	22
Cop. (%)	49	48	41	4	9	98	96	84	83
P_{tot} (Km)	16,3	17,2	4,8	3,0	5,8	2,1	3,2	9,7	10,4
$\mu(P/A)$ (1/m)	1,30	1,29	1,11	0,92	1,08	0,02	0,90	1,30	1,43
$\mu(PC/A)$	1,53	1,51	1,62	1,42	1,49	2,52	1,86	1,57	1,80
$\mu(RCC)$	0,70	0,71	0,66	0,72	0,70	0,78	0,78	0,74	0,70
$\mu(d_p)$	5,8	4,9	10,6	18,1	6,6	-	4,5	3,2	3,4

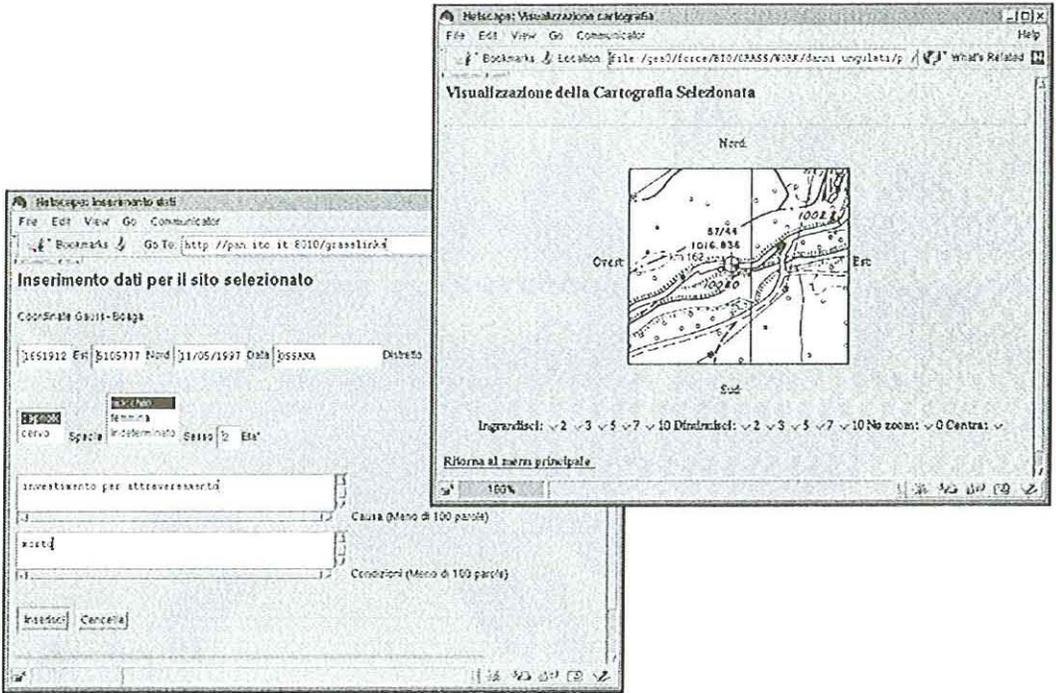


Fig. 6 - Esempio di interfaccia su browser per l'accesso da remoto ad un sistema GIS-DBMS. Sia il GIS che il DBMS (nel caso specifico rispettivamente GRASS e PostgreSQL) risiedono su un server e consentono ad un client l'inserimento di siti all'interno del GIS permettendo di associare a ciascun sito un insieme di informazioni memorizzate in un data base gestito da PostgreSQL..

sulle popolazioni faunistiche di nuove infrastrutture. Allo scopo di rendere il sistema aggiornabile con continuità da parte degli operatori faunistici, è stato sviluppato un sistema di tipo client-server che rende accessibile in rete il data base e la cartografia sviluppata e aggiornata (fig. 6).

Conclusioni

Come discusso nel testo, la scelta di tecnologie integrate permette di costruire "sistemi" dedicati a problemi importanti nella gestione ambientale. È significativo che, almeno a livello sperimentale, anche utenti non esperti possano essere messi in grado di accedere ed aggiornare le basi dati terri-

toriali necessarie allo sviluppo di modelli e alla gestione. L'esperienza di lavoro ha mostrato l'importanza di una stretta collaborazione tra chi sviluppa le tecnologie e i modelli e gli esperti che effettivamente guidano la gestione territoriale. È da segnalare come la complessa morfologia del territorio trentino generi una forte variabilità nei fattori da controllare nella costruzione di un modello territoriale, richiedendo dati ad alta risoluzione e modelli adeguatamente complessi, costituendo comunque uno stimolo allo sviluppo di nuovi metodi. Tra le prospettive di più interessante sviluppo futuro, potrebbe esservi l'applicazione delle metodologie di data mining a grandi basi di dati georeferenziate per il monitoraggio automatico dei fattori critici nella gestione ambientale.

Ringraziamenti

Le attività di ricerca applicata descritte in questo lavoro sono svolte in stretta collaborazione con gli esperti del Servizio Faunistico e del Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento; hanno contribuito nel reperimento dei dati cartografici il Servizio Statistica e l'Ufficio Urbanistica e Tutela dell'Ambiente. Alla ricerca hanno

inoltre collaborato il Centro di Ecologia Alpina, Angela Donini, Maria Franzoi e Stefano Menegon.

dott. Cesare Furlanello
dott. Stefano Merler
dott. ing. Lorenzo Potrich

ITC-irst
38050 Povo - Trento
e-mail: furlan@irst.itc.it

BIBLIOGRAFIA

BOUMAN C.A., SHAPIRO M., 1994 - *A Multiscale Random Field Model for Bayesian Image Segmentation*. IEEE Trans. On Image Processing, vol.3, no. 2, 162-177, March 1994.

DIAMOND W.J., 1989 - *Practical Experiment Design*. Van Nostrand Reinhold, New York.

FURLANELLO C., MERLER S., CHEMINI C., 1997 - *Tree-based Classifiers and GIS for Biological Risk Forecasting*. In: Morabito F.C. (ed), *Advances in Intelligent Systems*. IOS Press, Amsterdam, 316-323.

INGEGNOLI V., 1993 - *Fondamenti di Ecologia del Paesaggio*. Città Studi.

MERLER S., FURLANELLO C., CHEMINI C., NICOLINI G., 1996 - *Classification Tree Methods for Analysis of Mesoscale Distribution of Ixodes ricinus (Acari: Ixodidae) in Trentino, Italian Alps*. Journal of Medical Entomology, 33(6): 888-893.

PEITGEN O., JURGENS H., SAUPE D., 1992 - *Chaos and Fractals*. Springer-Verlag.

RICHARDS J.A., 1993 - *Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction*. Springer-Verlag.

Riassunto

In questo lavoro sono discusse le prospettive applicative aperte dall'integrazione di basi dati eterogenee, mappe digitali, immagini e flussi di informazioni territoriali per costruire metodi di monitoraggio e modelli numerici di cui si garantisce l'aggiornamento continuo. Il cuore di questi modelli è un ambiente GIS-DBMS, estensione di un classico sistema di gestione dei dati (DBMS) con le funzioni di un Sistema Informativo Geografico (GIS). Obiettivo di questo lavoro è mostrare come si possano costruire nuove applicazioni per la gestione ambientale introducendo in un sistema GIS-DBMS tecnologie software evolute. Sono discussi esempi applicativi per l'analisi dell'habitat faunistico, per il monitoraggio dei danni da ungulati alla silvicoltura, per il miglioramento ambientale e per il monitoraggio degli investimenti stradali di selvatici.

Summary

This paper introduces an approach to the integration of heterogeneous data-bases, digital maps, images and territorial information flows in order to build monitoring models on a landscape scale providing a continuous updating. The core of such a methodology is a GIS-DBMS environment, which is an extension of a classic system of data management (DBMS) with the functionality of a Geographic Information System (GIS). It is shown that new applications for environmental management can be obtained by introducing advanced software technologies in a GIS-DBMS. Examples are given of applications for wildlife habitat mapping, for the monitoring of the damage to forest renovation due to deer browsing, for the improvement of wildlife resources and for the monitoring of the effects of road-kills on wildlife.