

# **Analisi dell'evoluzione del paesaggio mediante l'approccio geostatistico ai dati telerilevati: il bacino del torrente Baganza (Parma)**

**Alessandro Ferrarini\* e Pierfrancesca Rossi, Orazio Rossi**

*Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma, Viale delle Scienze 11/A - 43100 Parma*

\* *Autore referente per la corrispondenza (al.ferr@nemo.unipr.it)*

*Pervenuto il 26.7.2002; accettato il 25.11.2002*

## **Riassunto**

Il paesaggio è un mosaico complesso in continuo divenire, i cui cambiamenti originano dalla interazione tra i fenomeni naturali e le azioni pianificate dall'uomo. Il territorio è formato da numerose componenti strutturali, ognuna con dinamiche proprie; l'analisi della sua evoluzione temporale deve considerare la natura di tutte le parti coinvolte, ma anche le loro specifiche frequenze, velocità e intensità di cambiamento nel tempo. Per tale motivo, la metodologia scientifica è importante almeno quanto la disponibilità di una informazione geografica adeguata riferita a periodi temporali differenti.

Nel presente lavoro, sono state utilizzate immagini satellitari Landsat riguardanti il bacino idrografico del torrente Baganza, riferite a periodi di tempo differenti, per l'acquisizione di informazioni sui cambiamenti intercorsi in tale area. Per mezzo del modello digitale del terreno (DEM), il bacino idrografico del Baganza è stato suddiviso in tre fasce altitudinali per ognuna delle quali, utilizzando l'approccio geostatistico, è stato possibile analizzare: a) le direzioni preferenziali del cambiamento; b) la scala spaziale alla quale è avvenuto; c) il grado di omogeneità/eterogeneità spaziale delle trasformazioni; d) l'informazione persa per l'inadeguatezza della risoluzione spaziale del satellite Landsat.

Tale approccio è in grado di cogliere efficacemente gli aspetti principali delle dinamiche del territorio e di fornire ipotesi approfondite sulle forze che le determinano, rappresentando nel contempo una metodologia scientifica a basso costo e di notevole utilità, per tutti coloro che si occupano di pianificazione e gestione territoriale.

PAROLE CHIAVE: paesaggio / dimensione temporale / geostatistica / satellite Landsat / telerilevamento

## **Abstract**

### **Landscape changes analysis through the geostatistic approach to remotely sensed data**

Landscape is a dynamic phenomenon that almost continuously changes. The overall change of a landscape is the result of complex and interacting natural and spontaneous processes and planned actions by man. Landscapes are formed by many components which all have their own dynamics of change. Therefore, studying change must consider the nature of all the components as well as their specific frequency, pace and magnitude of change. To detect changes, the method to describe or measure the landscape features is important as well as the availability of adequate and comparable information in map-like format for different time periods.

In this work, two Landsat images covering the Baganza stream watershed have been used. As they are related to different dates, they provide information about changes that happened inside the study area. Using the digital terrain model (DEM), the whole watershed has been divided into three altitudinal belts. Using the geostatistic approach a) the main directions of changes, b) their spatial scale, c) the degree of spatial homogeneity/heterogeneity of landscape modifications, d) the degree of information loosed because of the insufficient satellite resolution, have been analyzed. Our approach can enhance the main causes of landscape changes and it provides deep hypotheses about their driving forces. In addition, it represents a low-cost scientific methodology, that is very useful to people planning and managing landscape.

KEY WORDS: landscape / temporal dimension / geostatistic / Landsat data / remote sensing

## INTRODUZIONE

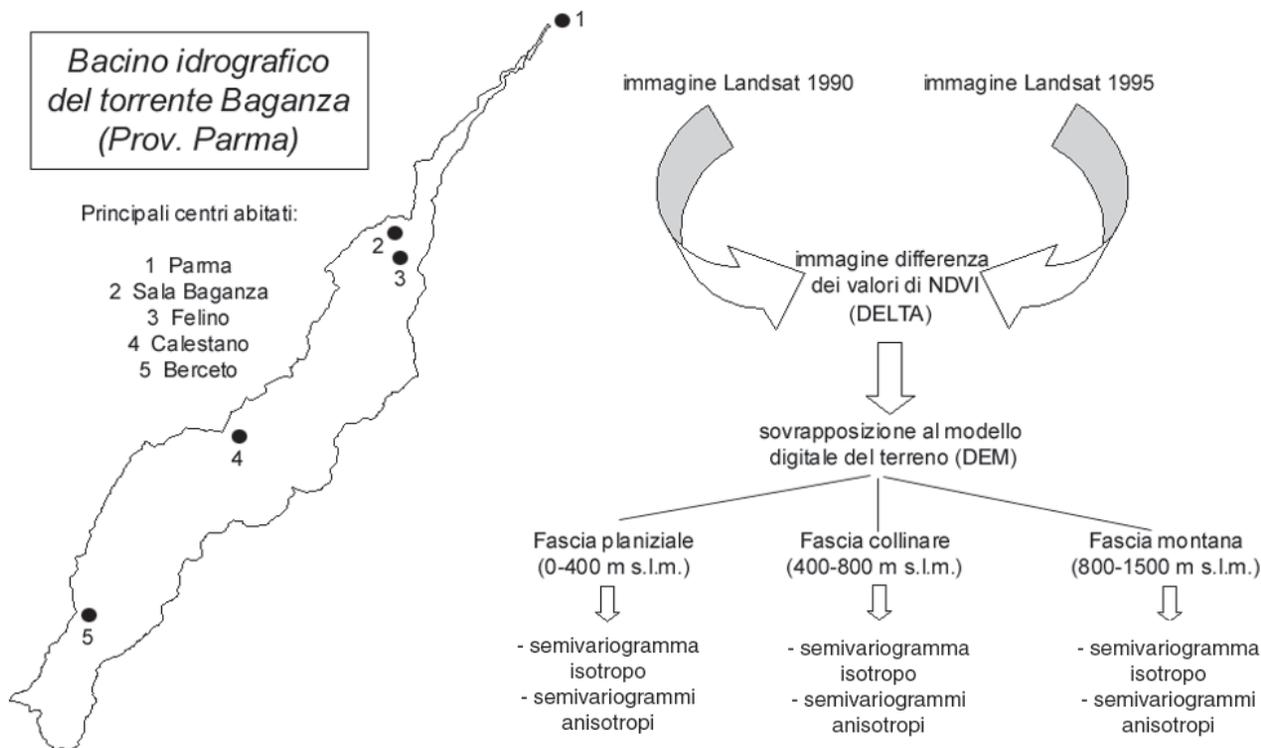
L'informazione sull'uso reale del territorio è fondamentale per progetti di pianificazione e gestione ambientale. Il paesaggio si modifica rapidamente nel tempo in relazione a fattori economici, sociali e naturali. Per monitorare tali cambiamenti è necessario disporre di informazioni sinottiche sul territorio, rilevate a tempi differenti, e il telerilevamento satellitare rappresenta la metodologia più adatta e più economica per acquisirle. Nello stesso tempo sono necessari anche algoritmi scientifici che sappiano cogliere in profondità i cambiamenti intercorsi nel paesaggio, utilizzando al massimo l'informazione contenuta nelle immagini telerilevate. Sono riportati in letteratura numerosi approcci all'analisi delle modifiche del territorio mediante il *remote sensing*. Confronti tra classificazioni del territorio realizzate a tempi diversi, composizioni in falso colore, uso di tecniche statistiche quali le componenti principali e algebra matriciale, sono solo alcune delle metodologie sperimentate (JENSEN, 1996; SINGH, 1989). Nessuna delle precedenti metodologie è però in grado di rendere esplicito l'andamento spaziale del cambiamento intercorso nel territorio, ovvero la scala spaziale e le direzioni preferenziali alle quali è avvenuto. L'analisi del *trend* spaziale delle modifiche del territorio può anche suggerire ipotesi approfondite sulle cause, la velocità e le direzioni preferenziali lungo cui i cambia-

menti intercorrono. Per tale motivo, nel presente lavoro si propone l'approccio geostatistico ai dati telerilevati. La geostatistica è una branca della statistica che analizza la variazione spaziale dei dati da analizzare e risulta particolarmente utile quando la continuità/discontinuità spaziale di un fenomeno rappresenta un elemento determinante.

Lo scopo del lavoro è di proporre un algoritmo scientifico di validità generale in grado di cogliere in profondità le proprietà emergenti delle dinamiche del territorio.

## AREA DI STUDIO, MATERIALE E METODI

L'area di studio è il bacino idrografico del Torrente Baganza (Prov. Parma) situato nel versante emiliano dell'Appennino settentrionale. Il bacino occupa una superficie di 177,5 km<sup>2</sup>, si estende da Parma (60 m s.l.m.) al monte Cervellino (1493 m s.l.m.) e presenta un asse longitudinale con direzione 45 gradi (Fig. 1). Il profilo complessivo della Val Baganza è determinato essenzialmente dal gradiente altitudinale (Rossi P., 1999) che dà luogo alla formazione di differenti popolamenti vegetali e ad una diversa presenza dell'uomo. Nella zona pianeggiante la vegetazione è limitata alle zone a minore impatto antropico, mentre nell'area collinare la vegetazione forestale è rappresentata da boschi di caducifoglie a roverella e carpino nero e, solo in minor



**Fig. 1.** A sinistra, il bacino idrografico del torrente Baganza con, in evidenza, i principali centri abitati. A destra, una sintesi della metodologia utilizzata nel presente lavoro.

parte, da cenosi boschive igrofile a pioppo. Diffusi sono i rimboschimenti di pino nero, espressione dell'antropizzazione del paesaggio. Nella zona submontana i boschi a cerro diventano i complessi forestali più estesi, mentre in quella montana, a quote superiori ai 900-1000 m s.l.m., dominano quelli a faggio.

Le due scene Landsat TM 5 utilizzate nel presente lavoro sono state riprese alle ore 9 del mattino dell'11 agosto 1990 e del 24 luglio 1995 rispettivamente e georeferenziate secondo la proiezione UTM (fuso 32 Nord). La corrispondenza degli orari delle riprese e del periodo dell'anno rivestono grande importanza nelle analisi di variazione temporale. L'area occupata dal bacino del torrente Baganza è stata individuata sovrapponendo il file vettoriale dei confini della valle alle due immagini satellitari.

Le modifiche subite dal territorio nel corso dei 5 anni in esame sono state studiate analizzando nelle 2 scene Landsat le variazioni dell'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, ROUSE *et al.*, 1974). Tale indice viene calcolato sulle immagini Landsat secondo la formula:

$$NDVI = (banda\ 4 - banda\ 3) / (banda\ 4 + banda\ 3)$$
 Esso utilizza la risposta nei canali del rosso centrato intorno a 0,66  $\mu$ m (banda 3, regione di forte assorbimento della clorofilla) e del vicino infrarosso, intorno a 0,86  $\mu$ m (banda 4, regione di forte riflettanza dello strato vegetativo). La risposta nei due canali è funzione della specie vegetale, delle condizioni di salute o di stress (disponibilità idrica e di nutrienti) (GUYOT, 1989), ed è fortemente correlata a variabili di fisiologia vegetale come il  $f_{ipar}$  (frazione della radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla vegetazione) e il L.A.I. (*Leaf Area Index*) (LAW e WARING, 1994). In linea teorica, l'NDVI può assumere valori compresi tra -1 e +1. In pratica, l'intervallo si colloca tra +0,7 (vegetazione molto densa a latifoglie) e -0,4 (corpi d'acqua). Valori compresi tra 0,3 e 0,4 sono tipici delle aree a prato, mentre il litoide assume valori prossimi a zero. I rimboschimenti ad aghifoglie assumono valori pari a circa 0,5. Le variazioni dell'indice NDVI possono essere causate da modifiche dell'uso reale del suolo (per esempio, le azioni di rimboschimento determinano un forte aumento di NDVI, mentre la cementificazione derivante dall'espansione degli abitati ne causa una forte diminuzione) o da variazioni dello stato fenologico della vegetazione. L'importanza dell'indice NDVI risiede anche nella sua proprietà di minimizzare gli effetti atmosferici. Per i suoi caratteri di completezza può essere quindi utilizzato come vettore sintetico di informazione per studi di modifiche temporali del paesaggio (GRIFFITH *et al.*, 2002; REMMEL e PERERA, 2001; WALSH *et al.*, 2001).

In un precedente lavoro (FERRARINI *et al.*, 2000),

dopo le necessarie correzioni geometriche e spettrali si è proceduto a calcolare l'indice NDVI per entrambe le immagini Landsat e quindi si è operata una differenza *pixel per pixel* tra le due. L'immagine risultante (DELTA) ha fornito l'informazione sui cambiamenti intercorsi nell'area di studio tra le due date prese in esame. Tale informazione ha permesso di rilevare alcuni aspetti fondamentali del dinamismo a medio e breve termine del bacino come, per esempio, la grande stabilità della zona a faggeta oltre i mille metri e il dinamismo antropico (agricoltura ed espansione dell'urbano) della parte pianiziale e collinare della valle.

Nel presente lavoro, si procede ad un'analisi molto più approfondita di DELTA, allo scopo di evidenziare la presenza di eventuali *trend* spaziali, nonché la scala e l'intensità dei cambiamenti intercorsi tra le due date. A tale scopo, è stato scelto l'approccio geostatistico ai dati telerilevati. DELTA è stata inserita all'interno del GIS ArcView e sovrapposta al modello digitale del terreno (DEM) dell'area di studio, allo scopo di suddividerla in tre fasce altitudinali (pianura, collina, montagna). Tali fasce sono state scelte perché soggette ad una differente pressione antropica (decrescente dalla pianura alla montagna) ed in accordo alla loro diversa composizione strutturale (geomorfologica e biologica) (ROSSI P., 1999). Per ogni fascia, DELTA è stata analizzata mediante un semivariogramma (SV) isotropo (che media le caratteristiche del cambiamento su tutte le direzioni geografiche) e 8 semivariogrammi (SV) anisotropi che tengono conto della direzionalità dei cambiamenti intercorsi. Il SV (Fig. 2) viene definito come:

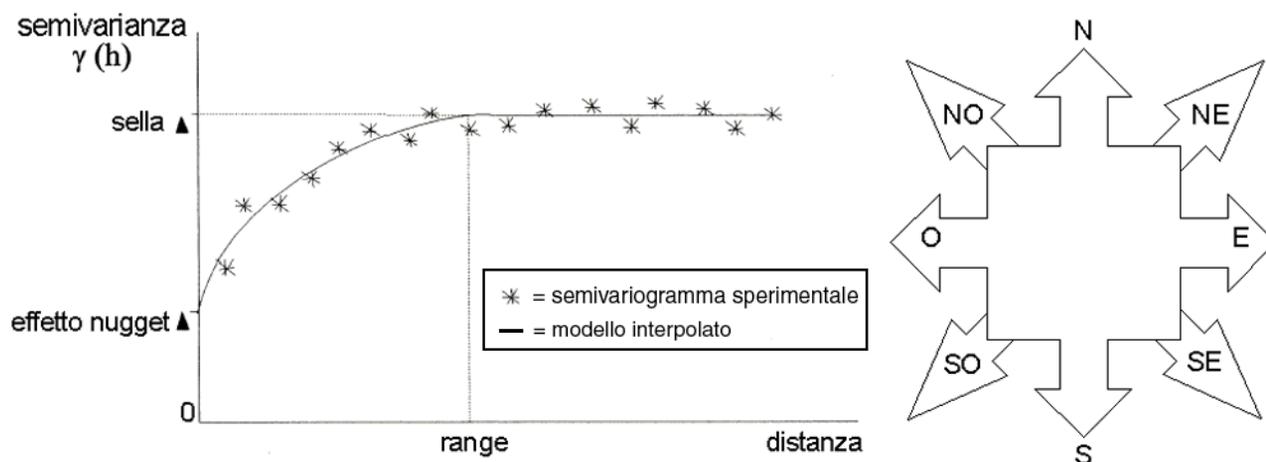
$$\gamma(h) = 0,5 * (\text{Var}(Z(u+h) - Z(h)))$$

dove  $Z(u)$  è il valore assunto dalla variabile  $Z$  nella localizzazione  $u$  e  $Z(u+h)$  è il valore assunto nella localizzazione  $u+h$ , la funzione  $\text{Var}$  calcola la varianza degli incrementi tra le coppie di osservazioni che distano  $h$  (valore detto *lag*). In accordo con MATHERON (1963), la formula del SV è:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{n(h)} (Z(u_i) - Z(u_j))^2}{2 * n(h)}$$

dove  $n(h)$  è l'insieme delle coppie di dati ( $u_i, u_j$ ) che distano  $h$ , mentre  $|n(h)|$  rappresenta il loro numero. Essendo  $h$  un vettore, il SV può essere calcolato lungo diverse direzioni dello spazio. Per un valore prefissato dell'angolo  $\alpha$ , il SV misura la diversità dei valori assunti dalla variabile  $Z$  al crescere della distanza tra le coppie di punti. Al variare dell'angolo  $\alpha$ , i SV corrispondenti individuano le caratteristiche direzionali della variabile  $Z$ .

Per dati distribuiti irregolarmente può accadere che esistano poche coppie di osservazioni distanti tra loro



**Fig. 2.** A sinistra sono schematizzate le principali caratteristiche di un semivariogramma. La sella rappresenta il valore massimo di semivarianza (asse delle ordinate). Il range è la distanza (asse delle ascisse) alla quale viene raggiunta la sella. Il nugget rappresenta il valore di semivarianza quando il range tende a 0. Gli asterischi rappresentano il semivariogramma sperimentale ovvero quello calcolato sui dati a disposizione. La linea curva rappresenta l'interpolazione (con il metodo dei minimi quadrati) del semivariogramma sperimentale. A destra, sono indicate le 4 direzioni principali lungo cui possono essere calcolati i semivariogrammi: Nord-Sud (NS, direzione 0 gradi), Nord Est - Sud Ovest (NE-SO, 45 gradi), Est-Ovest (EO, 90 gradi) e Sud Est-Nord Ovest (SE-NO, 135 gradi).

esattamente  $h$ , rendendo necessario l'utilizzo di un valore di tolleranza sia per  $h$  che per l'angolo  $\alpha$ . Per gli scopi del presente lavoro si è posta la tolleranza di  $\alpha$  pari a 0,  $lag$  pari a 5 *pixel* e la tolleranza del  $lag$  pari a 2,5 *pixel*: in questo modo vengono considerate nel calcolo della semivarianza tutte e solo le coppie di osservazioni disposte lungo le 8 direzioni indagate.

Se il SV raggiunge un valore limite (detto sella) allora esiste una distanza (detta *range*) oltre la quale  $Z(u)$  e  $Z(u+h)$  non sono più correlate, ovvero all'aumentare di  $h$  la semivarianza non cambia. Per distanze minori al valore di *range*, le coppie di valori tendono ad essere tanto più simili quanto più sono spazialmente ravvicinate. L'informazione spaziale fornita dal *range* permette la comprensione della scala alla quale avviene la variazione della variabile  $Z$ . Valori bassi del *range* indicano che la varianza totale viene "spesa" in spazi brevi ovvero, preso un punto qualsiasi dell'area di studio, muovendosi nella direzione indagata di una distanza pari al *range* si incontra tutta la variabilità presente nell'intera area in esame. All'opposto, valori alti indicano che le modifiche a livello locale non sono comparabili con quelle a livello più globale. La sella rappresenta il totale di variazione (varianza) presente nei dati analizzati (CRESSIE, 1993). Per gli scopi del presente lavoro, la sella evidenzia il grado di omogeneità/eterogeneità dei cambiamenti dell'indice NDVI nelle diverse direzioni indagate (SV anisotropi). Bassi valori di sella indicano che i valori di DELTA tendono ad essere molto simili lungo una certa direzione (omogeneità), all'opposto valori elevati indicano grandi differenze nella variazione dell'indice NDVI (eterogeneità).

L'effetto *nugget* descrive il comportamento del SV vicino all'origine. Al tendere di  $h$  a 0, il valore assunto dal SV rappresenta l'informazione persa per variazioni che avvengono ad una scala inferiore a quella utilizzata per il campionamento (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989). Se infatti definiamo, secondo i precetti della teoria dell'informazione, la varianza (o semivarianza) dei dati campionati come l'informazione ad essi associata (a varianza nulla corrisponde informazione nulla), il *nugget* rappresenta la varianza (o semivarianza) non colta perché presente a scale inferiori a quelle campionabili. Risulta di particolare interesse il valore di *nugget* relativo (NR), definito come il rapporto tra il *nugget* e la sella. Il NR rappresenta il rapporto tra l'informazione persa e quella effettivamente colta e, quindi, l'informazione spaziale persa per inadeguatezza del sensore. Per gli scopi del presente lavoro, valori elevati di NR evidenziano modifiche dell'indice NDVI avvenute prevalentemente a scale *sub-pixel* (inferiore cioè a 30 m). All'opposto, valori bassi di NR indicano cambiamenti del valore di NDVI avvenute a scale comparabili o superiori a quelle del satellite Landsat.

In accordo con JOURNAL e HUIJBREGTS (1978), sono state rispettate le seguenti due regole: a) per ogni valore di  $h$  sono presenti almeno 30 coppie di punti; b) la distanza massima considerata per il calcolo del SV è minore della metà della massima distanza possibile tra coppie di punti. Le analisi esplorative condotte sui dati di partenza hanno evidenziato la presenza di alcuni, sebbene limitati, *outliers* spaziali, messi in evidenza da un coefficiente elevato di scostamento dalla normalità gaussiana della distribuzione dei valori di NDVI. Per

tale motivo, si è fatto uso del SV calcolato secondo il metodo robusto proposto da CRESSIE e HAWKINS (1980):

$$\gamma(h) = \left( \frac{\sum_{n(h)} |Z(u_i) - Z(u_j)|^{0.5}}{n(h)} \right)^4 * \frac{1}{2 * (0.457 + \frac{0.494}{n(h)})}$$

Il metodo è particolarmente efficace quando, come nel presente caso di studio, la distribuzione dei dati è vicina alla normalità gaussiana nella parte centrale e lontana da essa nelle code. Tale metodo, senza eliminare alcuna delle osservazioni utilizzate per il calcolo del SV, rimuove quasi completamente l'effetto degli *outliers* presenti nell'analisi ed è risultato dunque indispensabile per gli scopi del presente lavoro. L'alternativa sarebbe stata la rimozione manuale degli *outliers* presenti, lavoro oneroso e che avrebbe richiesto molto tempo per la loro individuazione tra decine di migliaia di altre osservazioni.

La modellizzazione (*fitting*) dei SV isotropi delle tre fasce altitudinali è avvenuta mediante il modello sferico:

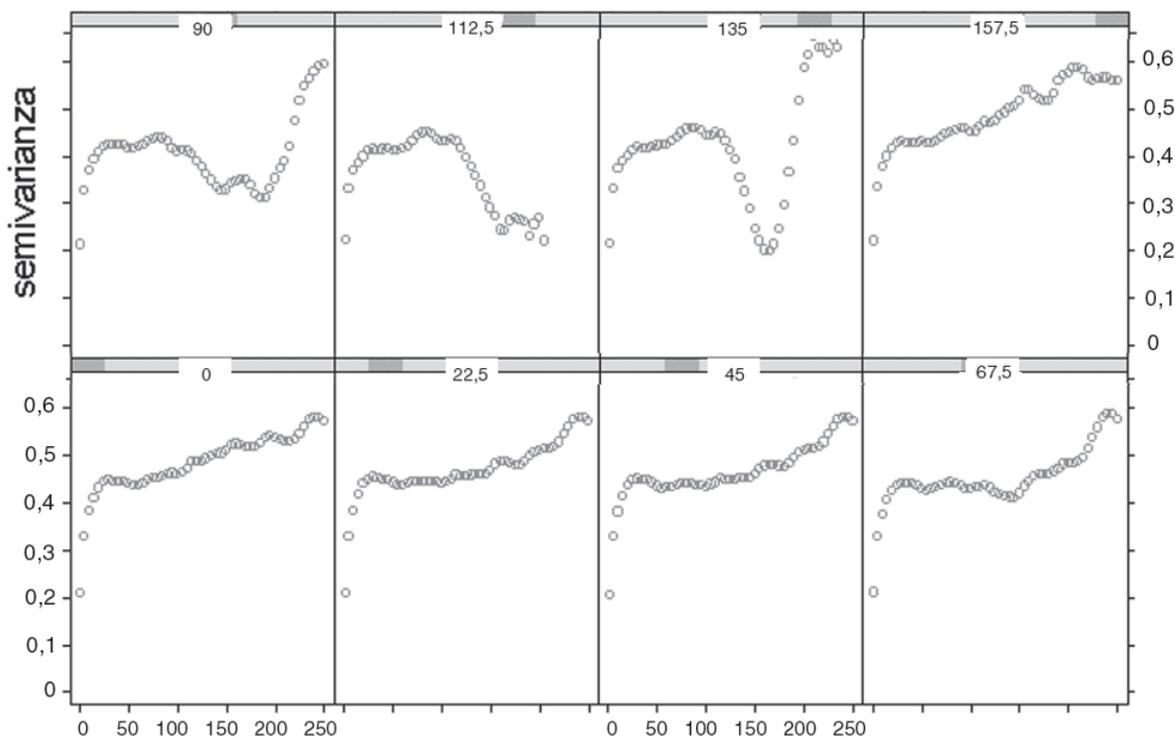
$$\gamma(h) = n + \begin{cases} s * ( 1.5 * \frac{h}{r} - 0.5 * \frac{h^3}{r^3} ) & \text{per } h \leq r \\ s & \text{per } h > r \end{cases}$$

dove *s* è il valore di sella, *n* il valore di *nugget* ed *r* quello di *range*. Tale equazione ha permesso di interpolare il SV sperimentale con precisione maggiore rispetto ai modelli gaussiano ed esponenziale. Non è stato necessario interpolare i SV anisotropi poiché la loro funzione si limita ad evidenziare la presenza di *trend* direzionali nelle variazioni dell'indice NDVI.

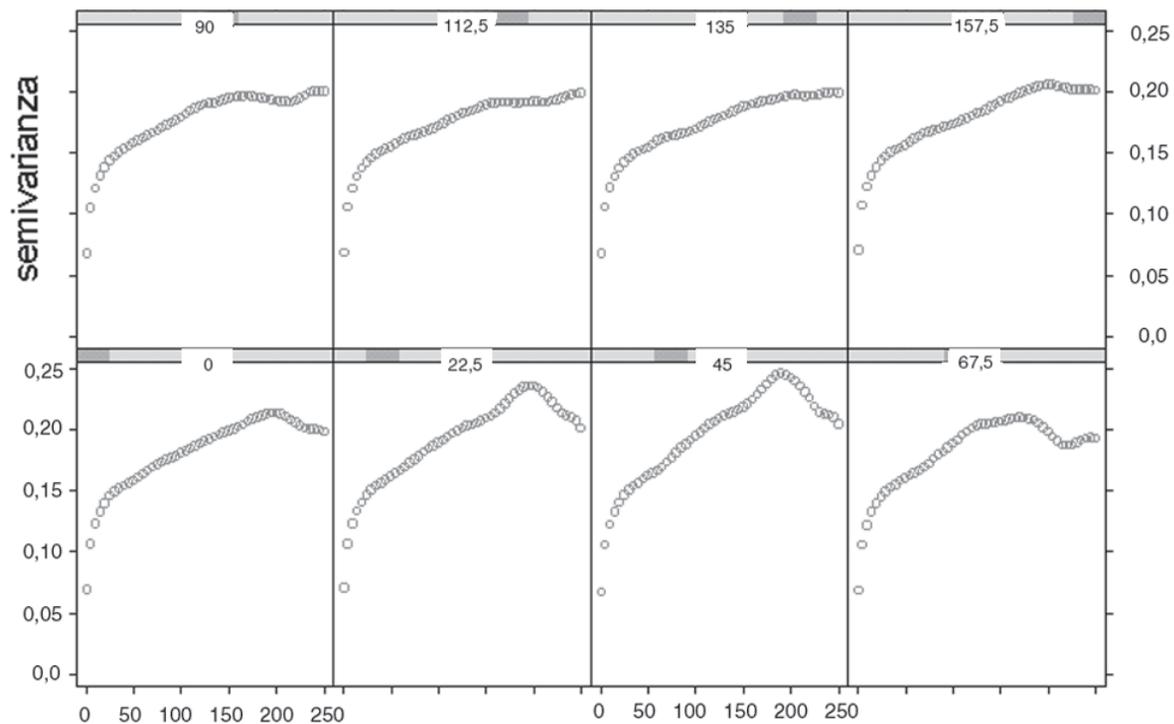
**RISULTATI**

I SV anisotropi della fascia planiziale (0-400 m s.l.m.) sono riportati in Fig. 3. Si nota che il loro andamento è complesso con una semivarianza che tende, in linea di massima, ad un valore limite (sella). Essi mostrano un andamento generalmente crescente all'aumentare della distanza, con presenza di micro-strutture simil-sinusoidali con periodo di circa 50 *pixel*. Tali micro-strutture sono molto probabilmente riconducibili a "oggetti" presenti nella fascia planiziale "in modo periodico" e aventi dimensioni dell'ordine all'incirca dei 25 *pixel*: presumibilmente si tratta di campi coltivati.

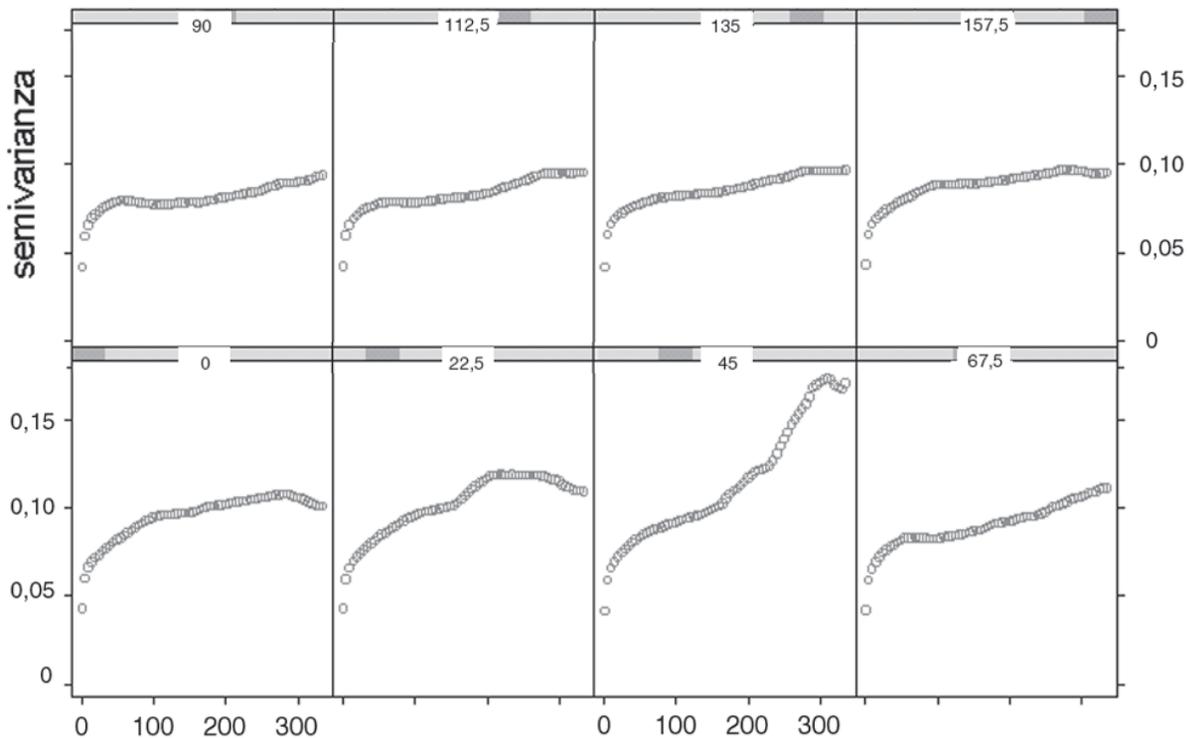
I SV riferiti alla direzione N-S (Nord-Sud, direzione 0 gradi), N NE-S SO (Nord Nord Est-Sud Sud Ovest, 22,5 gradi), NE-SO (45 gradi) e S SE-N NO (157,5 gradi) sono piuttosto simili tra loro. I SV delle direzioni



**Fig. 3.** Semivariogrammi anisotropi sperimentali della fascia planiziale. Sull'asse delle ascisse la distanza è misurata in pixels Landsat (1 pixel = 30 m). L'angolo varia di 22,5 gradi, comprendendo l'asse Nord-Sud (0 gradi, riquadro in basso a sinistra), quello Est-Ovest (90 gradi, riquadro in alto a sinistra) e tutti quelli intermedi.



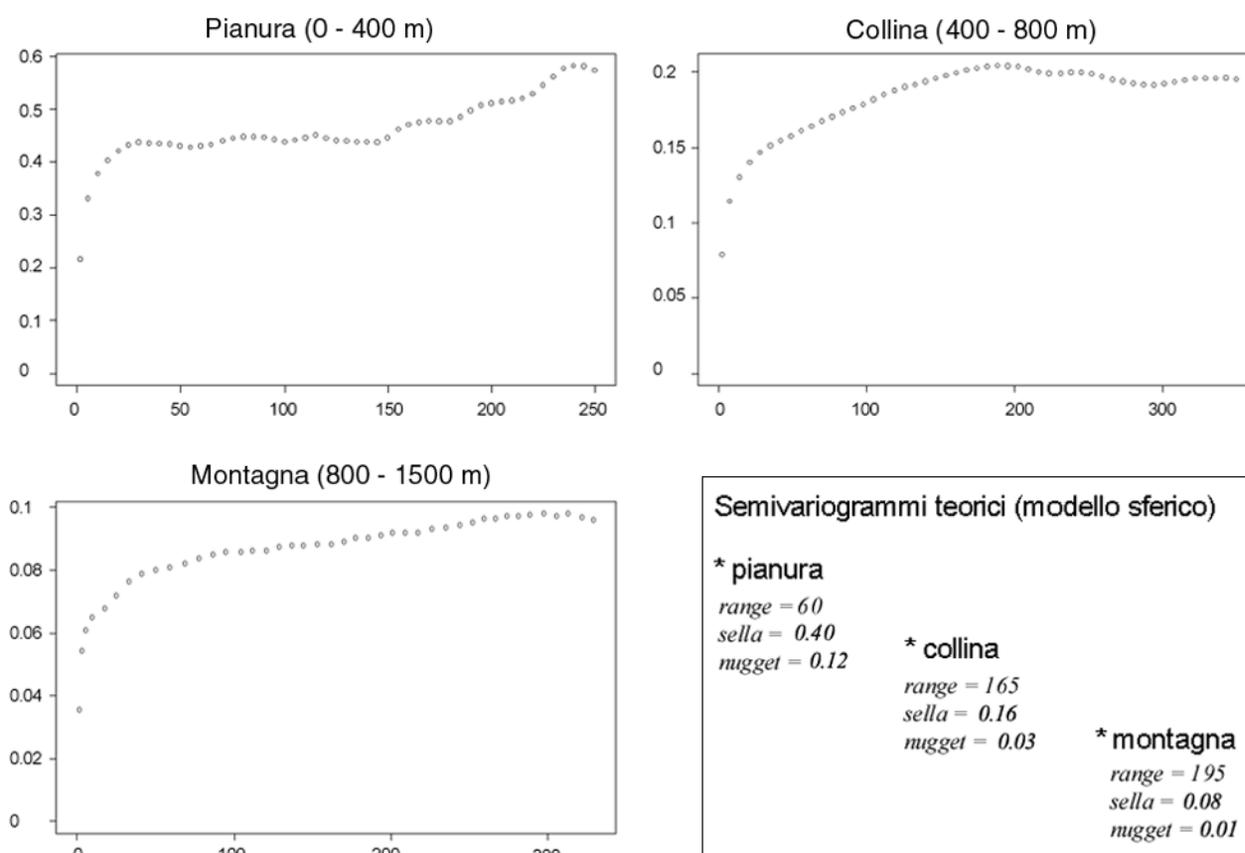
**Fig. 4.** Semivariogrammi anisotropi sperimentali della fascia collinare. Sull'asse delle ascisse la distanza è misurata in pixels Landsat (1 pixel = 30 m). L'angolo varia di 22,5 gradi, comprendendo l'asse Nord-Sud (0 gradi, riquadro in basso a sinistra), quello Est-Ovest (90 gradi, riquadro in alto a sinistra) e tutti quelli intermedi.



**Fig. 5.** Semivariogrammi anisotropi sperimentali della fascia montana. Sull'asse delle ascisse la distanza è misurata in pixels Landsat (1 pixel = 30 m). L'angolo varia di 22,5 gradi, comprendendo l'asse Nord-Sud (0 gradi, riquadro in basso a sinistra), quello Est-Ovest (90 gradi, riquadro in alto a sinistra) e tutti quelli intermedi.

E NE-O SO (67,5 gradi), E-O (90 gradi) e SE-NO (135 gradi) sono simili tra loro con la distanza e la semivarianza che sono correlate positivamente fino a circa 150 *pixel*, negativamente da 150 fino a 200 *pixel* e di nuovo positivamente da 200 *pixel* in poi. Il SV della direzione E SE-O NO (112,5 gradi) è simile ai tre precedenti con l'eccezione che manca della fase di risalita della semivarianza oltre i 200 *pixel*. Questo comportamento è dovuto al fatto che, lungo quella direzione per la particolare conformazione geografica della valle, mancano coppie di punti che distano più di 6 km. Il SV isotropo della fascia planiziale (Fig. 6) rappresenta l'andamento mediato sui singoli SV anisotropi. L'andamento è generalmente crescente con presenza di micro-strutture ad andamento simil-sinusoidale. Il *range* viene raggiunto rapidamente (60 *pixel* Landsat), la sella ha valore pari a 0,40 ed il *nugget* a 0,12. Il NR è uguale a 0,3 (30%). Poiché i SV anisotropi mostrano 2 tipologie di andamenti ben distinti, il SV isotropo non può essere considerato pienamente rappresentativo dell'andamento della variazione del-

l'indice NDVI della fascia planiziale. Esso riproduce il valore mediato di andamenti direzionali distinti. I SV anisotropi della fascia collinare (400-800 m s.l.m.; Fig. 4) presentano andamenti regolari, con semivarianza generalmente crescente all'aumentare della distanza tra le coppie di punti, presenza di sella e valori di *nugget* molto simili tra loro. I SV riferiti alla direzione N-S (0 gradi), N NE-S SO (22,5 gradi), NE-SO (45 gradi) e E NE - O SO (67,5 gradi) sono simili tra loro con una correlazione tra la distanza e la semivarianza che passa da positiva a negativa verso i 200 *pixel*. Le direzioni 22,5 e 45 gradi presentano valori di sella evidentemente più elevati. I restanti SV hanno una correlazione sempre positiva tra distanza e semivarianza, valori di sella ed effetto *nugget* praticamente uguali. Il SV isotropo della fascia collinare (Fig. 6) ha un andamento sostanzialmente crescente. Il *range* viene raggiunto a 165 *pixel*, la sella ha valore pari a 0,16 ed il *nugget* pari a 0,03. Il NR è uguale a 0,187 (18,7%). In questo caso, esso è rappresentativo della variazione dell'indice NDVI nella fascia collinare. I SV anisotropi



**Fig. 6.** Semivariogrammi isotropi sperimentali delle tre fasce (pianura, collina, montagna). La distanza sulle ascisse è espressa in pixels Landsat (1 pixel = 30 metri). Nel riquadro in basso a destra sono mostrati i modelli teorici di tipo sferico che interpolano i semivariogrammi sperimentali.

della fascia montana (800-1500 metri; Fig. 5) hanno andamento regolare, con bassi valori sia di *nugget* che di sella. La direzione 45 gradi fa eccezione per il valore elevato di sella. Il *range* ha invece valori particolarmente elevati in tutte le direzioni. Il relativo SV isotropo (Fig. 6) ha un andamento generalmente crescente. Il *range* è raggiunto a 195 *pixel*, la sella ha valore pari a 0,08 ed il *nugget* a 0,01. Il NR è uguale a 0,125 (12,5%). Esso rappresenta molto bene la reale variazione dell'indice NDVI avvenuta nei 5 anni indagati.

## DISCUSSIONE

Nella fascia di pianura il motore del cambiamento (identificabile con l'uomo) agisce in modo intenso in tutte le direzioni, dando luogo ad una elevata eterogeneità (alto valore di varianza totale) e producendo variazioni a scala locale (basso valore del *range*) tali da richiedere un campionamento più puntuale rispetto a quello del Landsat (alto valore del *nugget*). Le modifiche dell'indice NDVI sono causate dalle rotazioni colturali e dall'espansione/contrazione dell'urbanizzato e delle aree agricole. Tali modifiche vengono colte dai SV come un segnale caotico senza direzioni preferenziali. I cambiamenti avvengono ad una scala spaziale che richiederebbe un sensore con una migliore risoluzione geometrica per essere apprezzata come, per esempio, lo scanner MIVIS (*Daedalus AA5000 Multi-spectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* del Consiglio Nazionale Ricerche, Progetto L.A.R.A.-Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali).

Nella fascia di collina l'informazione spaziale persa per inadeguatezza del sensore è molto minore (NR 1,5 volte inferiore rispetto a quella di pianura). Le modifiche avvengono ad una scala molto più ampia rispetto a quella dell'area pianiziale (valore di *range* 2,75 volte maggiore). La diminuzione della pressione antropica è infatti responsabile di cambiamenti che operano a scala meno locale. La presenza di una ampia superficie boscata (48% circa della fascia collinare) determina una variazione dell'indice NDVI molto più omogenea dal punto di vista spaziale rispetto a quella della pianura (valore di sella 2,5 volte inferiore). L'analisi della direzionalità dei cambiamenti mostra caratteristiche sostanzialmente uguali in tutte le direzioni, se si eccettua quella a 45 gradi lungo la quale si ha una forte eterogeneità. Su tale direzione si colloca l'asse longitudinale della valle (Fig. 1) lungo il quale si concentra la gran parte del disturbo antropico (costruzione di strade, espansione/contrazione degli abitati, pratiche agricole) che si traduce in una maggiore eterogeneità spaziale delle modifiche dell'NDVI.

Nella fascia montana, le modifiche dell'indice NDVI hanno una varianza totale notevolmente bassa lungo tutte le direzioni, eccetto quella a 45 gradi che identi-

fica l'asse longitudinale della valle, lungo il quale si dispongono i pochi centri urbani presenti. In questo caso, il satellite Landsat è più che sufficiente per cogliere le variazioni che avvengono su scala non locale. Il sistema è prevedibile, i suoi cambiamenti sono polarizzati in una direzione preferenziale che è quella determinata dall'uomo. Su tempi brevi è improbabile che altre direzioni vengano coinvolte da modifiche eclatanti.

L'approccio classico all'analisi delle dinamiche del territorio richiede la mappatura delle immagini telerilevate di periodi diversi e il loro successivo confronto per stabilire, per ogni *pixel*, la classe iniziale e quella finale (operazione detta di *cross-tabulation*). Questa metodologia si scontra con numerose difficoltà, tra cui per esempio: a) errori di classificazione in una o in entrambe le immagini, b) incapacità di rendere espliciti i *trend* spaziali del cambiamento, c) inosservanza della scala spaziale a cui avvengono le dinamiche, d) impossibilità di prescindere dalla risoluzione spaziale del sensore utilizzato, e) dipendenza dei risultati dal sistema di classificazione utilizzato per mappare l'area di studio. L'approccio proposto nel presente lavoro supera le suddette difficoltà poiché non richiede la classificazione delle immagini telerilevate e permette di evidenziare, oltre ai *trend*, l'eventuale inadeguatezza di risoluzione da parte del sensore (analisi *sub-pixel*). Permette inoltre di analizzare contemporaneamente le dimensioni spaziale e temporale.

Sebbene le due riprese Landsat utilizzate non siano recentissime, è necessario considerare due aspetti. Mano a mano che si sale nella gerarchia strutturale dell'analisi ambientale (dai microsistemi al paesaggio) i cambiamenti tendono ad avvenire a scale temporali maggiori (WIENS, 1989): è dunque ragionevole pensare che quanto osservato sette anni fa nell'area di studio sia a tutt'oggi verificabile. Inoltre, il presente lavoro ha uno scopo prevalentemente metodologico. Come emerge dalla letteratura scientifica corrente, l'indice NDVI si dimostra un ottimo vettore informativo in grado di trattenere molta della informazione necessaria per analizzare le dinamiche del territorio. Le sue variazioni sono correlabili sia a variazioni dell'uso reale del suolo che a modifiche strutturali e funzionali della vegetazione.

L'approccio geostatistico ai dati telerilevati rappresenta un metodo poco dispendioso, a livello economico e di tempo, per analizzare in modo sinottico le dinamiche evolutive del territorio. Esso analizza le modificazioni che avvengono ad un livello gerarchico elevato (paesaggio) per inferire ipotesi sulle forze che, agendo a livelli gerarchici più bassi, le determinano. Uno svantaggio del metodo proposto risiede nella pesantezza computazionale. Il calcolo dei SV anisotropi

ha richiesto, ad un processore di frequenza 600 Mhz, quasi 30 minuti di tempo per ognuna delle tre fasce. Difficilmente si potrebbe fare uso di un calcolatore avente prestazioni inferiori. Si ritiene comunque che tale inconveniente sia di lieve entità rispetto ai vantaggi che il metodo proposto può fornire.

## CONCLUSIONI

Il territorio è un mosaico di molteplici componenti, ognuna delle quali ha una sua dinamica specifica. L'interazione tra le dinamiche delle singole parti genera l'evoluzione del territorio nel suo complesso. Comprendere le forze che generano tali modificazioni significa poter avanzare ipotesi sugli scenari evolutivi più probabili e, quindi, poter mettere in atto azioni pianificatorie efficaci.

Nel presente lavoro si propone l'approccio geostatistico ai dati telerilevati come una metodologia a basso costo e di grande efficacia per l'analisi delle caratteristiche evolutive del paesaggio. La geostatistica include una serie di tecniche aventi lo scopo di ricercare un modello che descriva la dipendenza spaziale tra i valori osservati. L'utilizzo congiunto della geostatistica e di un indice altamente informativo come l'NDVI rende possibile comprendere molte delle proprietà spaziotemporali dell'evoluzione dell'area di studio. È stato possibile mettere in evidenza le modifiche caotiche, su

scala locale, spazialmente eterogenee della zona pianiziale, dovute all'espansione edilizia e ai cicli colturali. Tali caratteristiche descrivono un sistema in evoluzione non direzionale, variabile su micro-scale e per il quale è assai difficile produrre scenari evolutivi anche su tempi brevi. All'opposto, la fascia montana rappresenta un sistema prevedibile, che evolve su macro-scale, facilmente monitorabile mediante telerilevamento satellitare e con una sola direzione evolutiva. La fascia collinare rappresenta una situazione intermedia, ma più simile alla fascia montana poiché la direzione NE-SO risulta più interessata a fenomeni evolutivi rispetto alle altre.

Poiché le variazioni dell'indice NDVI sono state analizzate su tempi brevi (5 anni), era prevedibile che venissero messe in luce specialmente le dinamiche evolutive di cui l'uomo è il principale artefice. Utilizzando immagini Landsat relative a periodi più distanti (dati non disponibili per il presente lavoro) si potrebbero analizzare anche le dinamiche evolutive su tempi lunghi, in cui i fenomeni naturali agiscono con maggiore intensità.

La metodologia proposta ha validità generale, potendosi applicare a qualunque area di studio e a qualunque sensore satellitare. Per quanto esposto in precedenza, tale metodo ha grande valenza scientifica e applicativa nel campo della gestione e pianificazione territoriale.

## BIBLIOGRAFIA

- CRESSIE N., 1993. *Statistics for spatial data*. Wiley, New York, 326 pp.
- CRESSIE N. e HAWKINS D.M., 1980. Robust estimation of the variogram. *Mathematical Geology*, **12**: 115-125.
- FERRARINI A., ROSSI P., ZACCARELLI N., 2000. Change detection degli Habitat CORINE nel bacino del Torrente Baganza (Prov. Parma) tramite l'indice NDVI. *Rivista Italiana di Telerilevamento*, **19**: 29-35.
- GUYOT G., 1989. *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Collection Télédétection Satellitaire n. 5. Paradigme, 178 pp.
- GRIFFITH, J. A., MARTINKO E. A., WHISTLER J. L., PRICE K. P., 2002. Preliminary comparison of landscape pattern-normalized difference vegetation index (NDVI) relationships to Central Plains stream conditions. *Journal of Environmental Quality*, **31**: 846-859.
- ISAAKS E.H. e SRIVASTAVA R.M., 1989. *An introduction to applied geostatistic*. Oxford University Press, New York, 284 pp.
- JENSEN J. R., 1996. *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective, second edition*. Prentice Hall series in Geographic Information Science, 246 pp.
- JOURNAL A.G. e HUIJBREGTS C.J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 254 pp.
- LAW B. E., WARING R. H., 1994. Remote Sensing of Leaf Area Index and Radiation intercepted by understory vegetation, *Ecological Applications*, **4**: 272-279.
- MATHERON G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, **58**: 1246-1266.
- REMMEL T.K., PERERA A.H., 2001. Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection. *Forest Ecology and Management*, **152**: 119-129.
- ROSSI P., 1999. *Analisi della diversità vegetazionale mediante la classificazione CORINE Biotopes*. Tesi di Laurea in Scienze Biologiche, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Università di Parma.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SHELL J.A., DEERING D.W., HARLAN J.C., 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Final Report, Type III, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 371 pp.
- SINGH A., 1989. Digital change detection techniques using Remotely sensed Data. In: Eden M.J. and Parry J.T. (eds.), *Remote Sensing and Tropical Land Management*. John Wiley & Sons, London, 254 pp.
- WALSH S.J., CRAWFORD T.W., WELSH W.F. e CREWS-MEYER K.A., 2001. A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, northeast Thailand. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **85**: 47-64.
- WIENS J.A., 1989. Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, **3**: 385-397.