

PRIMI RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE DI ANALISI STATISTICA IN CONTESTO SPAZIALE DEI PS- InSARTM PER STUDI NEOTETTONICI

Luca MALLEEN, Michele MORELLI, Gabriele NICOLÒ

Arpa Piemonte, Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, c.so U. Sovietica, 216 – 10141 TORINO,
tel.: +39 011 3169267, fax: +39 011 3169340, e-mail: g.nicolo@arpa.piemonte.it

Riassunto

Nel corso dell'anno 2007 è stata avviata dal Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche di Arpa Piemonte un'attività di sperimentazione di tecniche di analisi statistica in contesto spaziale applicata a osservazioni interferometriche SAR. La sperimentazione, che si prevede di ultimare entro il 2008, riguarda un'ampia porzione del Piemonte centro-meridionale. Dalla prima fase di applicazione della metodologia emergono risultati interessanti che consentono da un lato di connotare fenomeni neotettonici di sollevamento differenziale a scala regionale in accordo con i dati di letteratura, dall'altro di evidenziare l'utilità delle tecniche di analisi in questione per lo studio delle osservazioni interferometriche con tecnica *PS-InSARTM*.

Abstract

The Regional Centre for Geological Researches of Arpa Piemonte (Italy) has started an experimental research project during the current year on spatial statistics techniques applied to interferometric radar observations. The experimentation is carried out on a wide area of the middle southern Piemonte and is thought to be concluded by the end of 2008. The results emerging from the first phase of this study allow to identify neotectonics differential uplifts consistent with geological model and to point out the effectiveness of the above mentioned statistics techniques in interferometric radar data analysis (*PS-InSARTM*).

Introduzione

Il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche dell'Arpa Piemonte nell'ambito delle sue funzioni istituzionali svolge diverse attività rivolte all'approfondimento delle conoscenze geologiche del territorio. Attraverso la struttura Sistema Informativo Geografico esercita attività di sperimentazione nell'ambito della geomatica al fine di valutare possibili ricadute applicative nello studio dei fenomeni geologici e, più in generale, di quelli ambientali. Nel corso del 2007 è stata avviata un'attività di sperimentazione di tecniche di analisi statistica in contesto spaziale applicata a osservazioni interferometriche acquisite con la tecnica dei *Permanent Scatters (PSInSARTM)* per studi riguardanti problematiche di carattere neotettonico. L'indagine interessa un settore del Piemonte centro-meridionale sito in un contesto di notevole interesse geodinamico in quanto zona di "giunzione" tra il basamento Alpino e quello Appenninico. Questo settore che comprende i sistemi collinari dei domini tetto-sedimentari della Collina di Torino e del Monferrato, dei margini settentrionali dei bacini Cenozoici di Savigliano e di Alessandria e il margine occidentale dell'avampaese padano (figura 1).

La tecnica interferometrica dei Permanent Scatters (PS) ha la capacità di identificare piccole deformazioni della superficie terrestre con accuratezza elevata (velocità media di un PS fino a 0,1 mm/anno) (Ferretti et al., 2001). Questo metodo consiste nel riconoscimento su immagini radar dei satelliti ERS-1 e ERS-2 SAR di singoli punti di riferimento (PS) da utilizzare per le misure di deformazione. I PS sono punti che mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini utilizzate al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservano quindi l'informazione di fase nel tempo. Questi corrispondono solitamente a strutture di

origine antropica e riflettori naturali (palazzi, dighe, antenne, affioramenti rocciosi ecc.) che mostrano una fase interferometrica stabile nel tempo. Tutti i dati di velocità di ogni PS sono relativi ad un punto assunto come stabile preso dal set di PS estratti dall'insieme delle immagini impiegate. Va inoltre considerato che le misure SAR rilevano i movimenti lungo la direzione individuata dalla congiungente satellite–bersaglio radar che nel caso dei sensori ERS è quasi verticale ($\sim 23^\circ$), per cui l'analisi PS fornisce misure di deformazione subverticale.

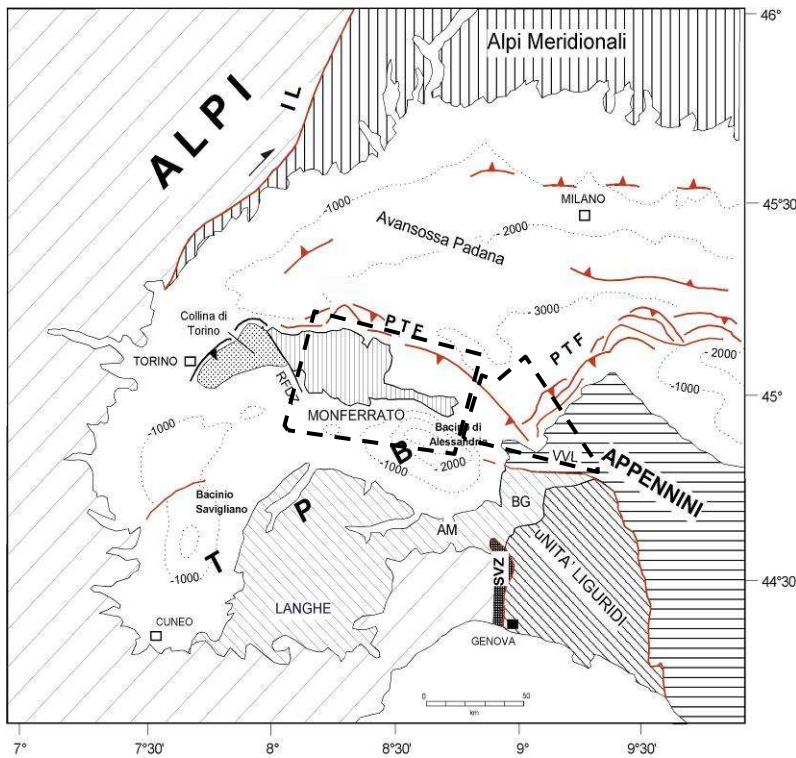


Fig. 1. - Schema strutturale dei bacini terziari nella zona di giunzione tra Alpi ed Appennino. LI: Linea Insubrica; LVV: Linea Villalvernia-Varzi; ZDRF: Zona di Deformazione di Rio Freddo; ZSV: Zona Sestri-Voltaggio; BTP: Bacino Terziario Piemontese; AM: Alto Monferrato; BG: Zona Borbera-Grue. Le linee tratteggiate indicano le isobate della base del Pliocene. Modificato da CNR - Structural Model of Italy (1990). Nei riquadri tratteggiati sono riportate le aree studiate, che corrispondono alle coperture delle scene ERS-1 ed ERS-2 SAR discendenti analizzate (vedi figura 2 per dettaglio).

Per il territorio in esame il dataset di PS generato consta di più di 100.000 punti suddivisi in due dataset (fig. 2).

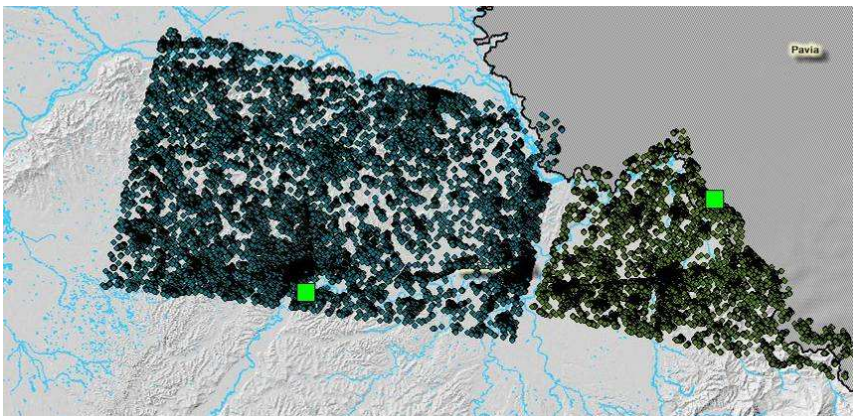


Fig. 2 Coperture dei PS analizzate relative alle track 251 e 480 e frame 2696 e 2691 acquisite in geometria discendente dai satelliti ERS-1 ed ERS-2 SAR tra il 1992 e il 2001. I valori di velocità sono relativi a due reference point distinti (quadratini verdi) (vedi figura 1 per localizzazione)

Una tale mole di dati, peraltro con densità di distribuzione assai variabile sul territorio, non può essere analizzata con il solo supporto di tecniche statistiche di tipo tradizionale, né attraverso strumenti standard di analisi GIS, ma necessita un approccio ibrido che coniughi la statistica e l'informazione spaziale. Inoltre in questo studio rivolto alla identificazione di elementi neotettonici si è avuta la necessità di ricercare i limiti di aree a comportamento omogeneo quali elementi tettonici di svincolo cinematico. Si è quindi optato per l'applicazione di tecniche di analisi funzionali ai seguenti obiettivi: 1) caratterizzare il fenomeno in termini di autocorrelazione spaziale

dei valori di velocità; 2) generare delle carte delle isocinetiche; 3) individuare le aree a comportamento omogeneo ed i rispettivi limiti. A tal fine sono state adottate tecniche di analisi geostatistiche e di analisi *cluster*.

Analisi geostatistica

Per la stima del grado di dipendenza spaziale (autocorrelazione) e della distribuzione dei valori di velocità dei PS, si è optato per un approccio geostatistico. Nello specifico è stato utilizzato l'*Ordinary Kriging (OK)*, uno stimatore lineare che, rispetto ai tradizionali interpolatori deterministici, presenta il vantaggio di basare la valutazione della variabile su un modello interpretativo del fenomeno fondato sull'analisi variografica dei punti campionati. Alla stima ottenuta dell'incognita viene inoltre associata una valutazione dell'errore (Davis J. C., 1986).

L'analisi variografica consiste nello studio dei valori di semivarianza di un campione di osservazioni per distanze crescenti (semivariogramma sperimentale). La semivarianza è una misura del grado di dipendenza spaziale tra i valori delle osservazioni e rappresenta la sommatoria delle differenze al quadrato tra coppie di punti separati da una distanza h :

$$\gamma_h = \sum_i^{n-h} (X_i - X_{i+h})^2 / 2n$$

In figura 3 è riportato un esempio di superficie variografica (in basso a sinistra) e di semivariogramma direzionale (in alto a sinistra) sperimentali relativi alla variabile velocità.

La superficie variografica riporta il valore di semivarianza nelle diverse direzioni dello spazio bidimensionale. Da questa si può evincere che la variabile in esame mostra un certo grado di anisotropia spaziale: lungo la direzione NO-SE infatti, si registra una maggiore variazione dei valori di semivarianza rispetto alla direzione NE-SO.

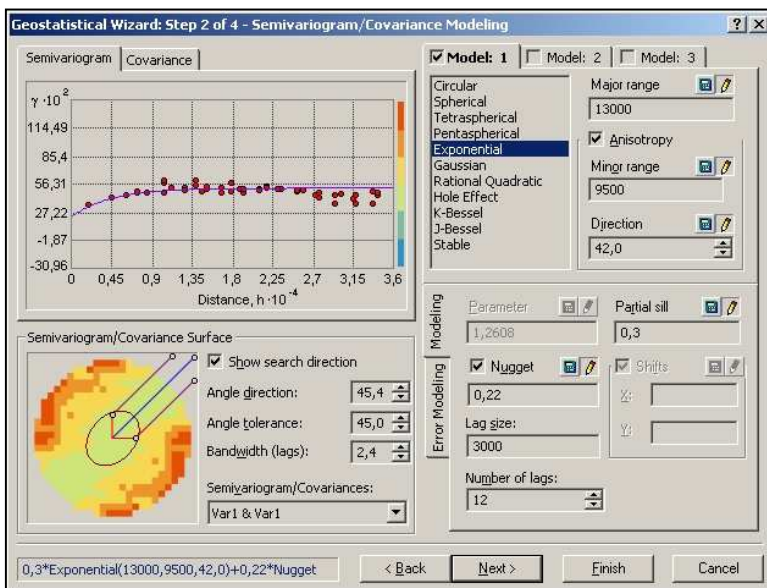


Fig. 3 Parametri utilizzati per l'analisi variografica. In alto a sinistra è riportato il semivariogramma direzionale sperimentale con la curva di best fitting; in basso a sinistra viene mostrata la superficie variografica.

Il semivariogramma direzionale riporta invece i valori di semivarianza lungo una specifica direzione dello spazio, per tutte le possibili distanze (multipli di h) del dominio spaziale in considerazione.

Obiettivo dell'analisi variografica è la scelta di un modello di semivariogramma in grado di fornire la migliore approssimazione (*best fitting*) dei valori del semivariogramma sperimentale. In fig 3 è riportata in viola la funzione di *best fitting* applicata lungo la direzione di massima autocorrelazione (NE-SO); dal diagramma si osserva che la semivarianza raggiunge un valore soglia (*sill*) ad una distanza di circa 13 km, oltre la quale non sembra esserci più correlazione (*range*). Analoghe considerazioni possono essere fatte lungo la direzione normale alla precedente.

Il medesimo diagramma consente inoltre di assumere l'ipotesi di stazionarietà statistica del fenomeno, ovvero di invarianza per traslazione. I risultati dell'analisi geostatistica sono riportati in figura 4, dove viene rappresentata la distribuzione spaziale dei valori di velocità (mm/anno).

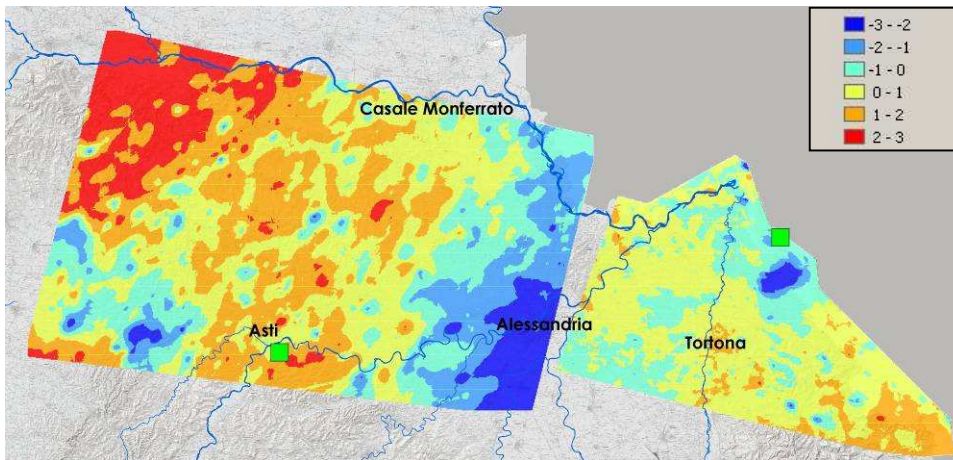


Fig. 4. Carta delle isocinetiche (mm/anno) relative alle aree di studio. I valori di velocità sono rappresentati in scala cromatica che varia dal blu (velocità negative) al rosso (velocità positive). I quadratini verdi rappresentano i reference point.

Analisi cluster

Per rispondere alla necessità di individuare le aree a comportamento omogeneo a scala regionale è stata realizzata un'analisi cluster, calcolando per ogni PS il valore dell'indice $G_i^*(d)$ (Getis A., Ord J. K., 1992). L'indice $G_i^*(d)$ è una misura della concentrazione delle somme di valori associati a una data variabile X spazialmente distribuita. La sua prima formulazione fu scritta come segue:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j}{\sum_j x_j} \quad [1]$$

dove x_j sono i valori dei punti j associati alla variabile X dell'intero dominio spaziale in studio e $w_{ij}(d)$ è la matrice dei pesi binari che assumono valore pari a uno quando il punto x_j è a una distanza massima d dal punto bersaglio x_i e zero in caso contrario. La statistica fu successivamente riformulata dagli stessi autori considerandola come la differenza tra $G_i^*(d)$ ed il suo valore atteso divisa per la deviazione standard (Ord J. K., Getis A., 1995). Sebbene ancora chiamata $G_i^*(d)$ la nuova formulazione combina il parametro originale con la sua significatività statistica in una singola misura. La statistica così ridefinita è in effetti uno *Z-score* ed è scritta come segue:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^*(d) - E(G_i^*(d))}{\sqrt{Var(G_i^*(d))}} \quad [2]$$

$Z(G_i^*)$ è quindi una misura di quante deviazioni standard $G_i^*(d)$ differisce dal suo valore atteso $E(G_i^*(d))$. Un valore alto positivo di $G_i^*(d)$ per un punto bersaglio i indica che i punti x_j contenuti nell'intorno di raggio d sono caratterizzati da alti valori di X in relazione al valore atteso. Un valore negativo di $Z(G_i^*)$ per un punto bersaglio i indica che i punti vicini mostrano valori bassi in relazione al valore atteso. Più alto in valore assoluto il valore di $Z(G_i^*)$, maggiormente significativa è l'anomalia. Concentrazioni nello spazio di valori alti, positivi o negativi, di $Z(G_i^*)$ individuano *cluster* di valori anomali: si parla di punto caldo (*hot spot*) o punto freddo (*cold spot*) quando i *cluster* risultano rispettivamente dall'aggregazione di valori positivi o negativi e statisticamente significativi. La scelta dei valori delle distanze d è un aspetto chiave nell'investigazione del problema. Ai fini di questo studio per definire i limiti superiori ed inferiori dei valori di d si sono presi in considerazione la scala del fenomeno in esame, così come dedotta dal modello geologico e

il valore del *range* dedotto dall'analisi variografica, ovvero la distanza massima oltre la quale il fenomeno non sembra mostrare autocorrelazione spaziale. Deve essere in ogni caso chiaro che non esistono distanze corrette o scorrette: è auspicabile infatti investigare il fenomeno a distanze diverse al fine di esplorare le relazioni spaziali a scale differenti. $Z(G_i)^*$ è stato calcolato per tre differenti distanze d : 10 km, 5 km, 2.5 km. I risultati dell'elaborazione a 10 km sono mostrati in fig 5: gli *hot spot* sono rappresentati con il colore rosso; i *cold spot* con il colore blu; gli altri colori presenti in mappa indicano punti non connotati da specifici *pattern* spaziali. Si noti come i limiti tra i *cluster* individuati dalla diversa colorazione assumano un andamento lineare spesso ben definito e confrontabile con gli elementi tettonici regionali. La connotazione in termini di *hot spot/cold spot* è stata effettuata considerando un livello di confidenza del 95%.

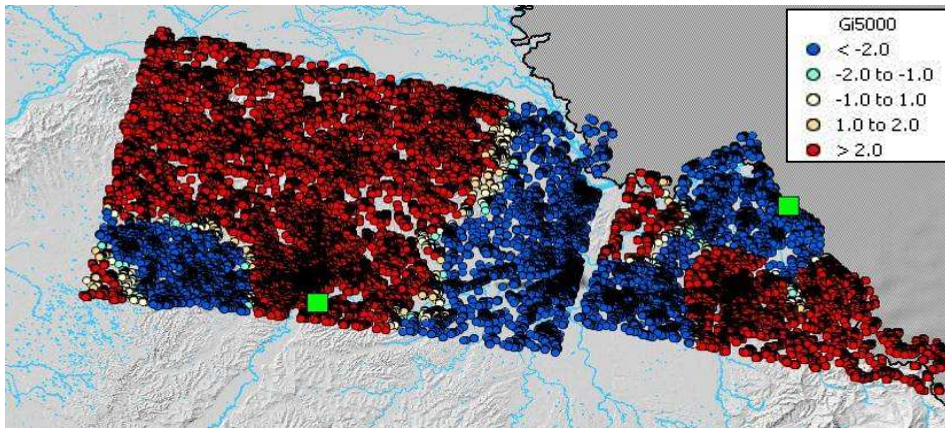


Fig. 5
Rappresentazione dei risultati dell'analisi Hot spot interpretabile come una carta dei settori a comportamento omogeneo intermini di velocità

Interpretazione dei risultati e conclusioni

Il confronto tra le carte cinematiche prodotte e il modello geologico evidenzia una distribuzione di areali in sollevamento e in abbassamento che, sebbene riferiti a referent point differenti, risultano geometricamente congruenti con i domini geologici in subsidenza e in sollevamento (figura 6).

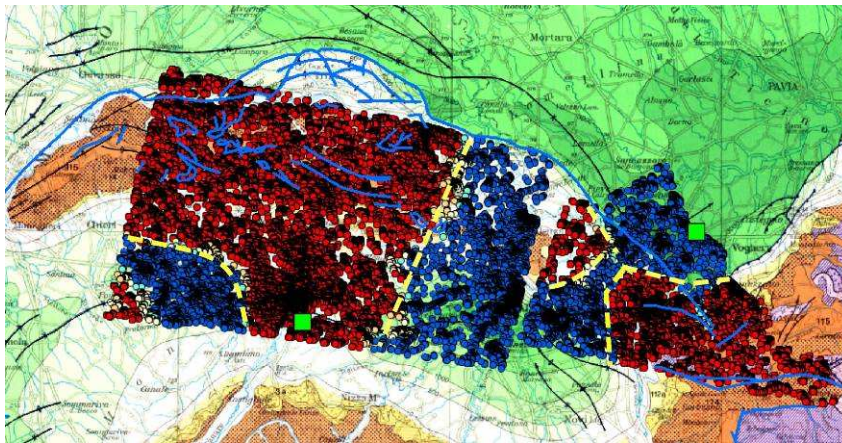


Figura 6. Confronto tra la carta dell'analisi Hot spot e il modello geologico dell'area in studio (CNR Structural Model of Italy, 1990). In blu sono rappresentate le strutture tettoniche principali, in giallo sono riportati i limiti tra gli areali a cinematica omogeneo.

In particolare i rilievi collinari del Monferrato costituiscono attualmente un dominio strutturale del *thrust belt* pliocenico sud-padano, sovrascorso verso Nord sulla successione mesozoico-terziaria dell'avanfossa padana. La progressiva migrazione del *thrust* padano ha prodotto in superficie comportamenti geodinamici differenziali tra questo settore collinare e l'antistante pianura padana, consistiti rispettivamente in un sensibile sollevamento e in una relativa stabilità. Questa mobilità tettonica è tuttora in atto ed è in accordo con le carte isocinetiche ottenute dall'analisi statistica dei PS i cui limiti mostrano una sensibile corrispondenza geometrica con quelli tettonici regionali (figura 6). Di particolare interesse tettonico sono i limiti statistici a direzione NE-SO che delimitano una larga fascia in subsidenza in contrasto sia con il generale sollevamento dell'intero dominio collinare del Monferrato sia con il suo l'assetto strutturale principalmente a direzione NO-SE.

Tuttavia studi geofisici evidenziano parallelamente a questa fascia la presenza della faglia Volpedo-Valle Salimbene (*sensu* Laubscher et al 1992). Questa rappresenta una struttura Oligo-Miocenica sepolta di importanza regionale riattivata come faglia di trasferimento dei fronti Padani nel Plio-Pleistocene. Questa corrispondenza evidenzierebbe una struttura tettonicamente attiva in accordo anche con la distribuzione della sismicità di questo settore. Le soluzioni focali evidenziano la presenza di strutture subverticali trascorrenti a direzione NE-SW (Massa et al., 2007).

Una buona corrispondenza si osserva nei anche nei settori a tergo dei rilievi collinari del dominio del Monferrato corrispondenti ai bacini Cenozoici di Savigliano e di Alessandria i cui limiti seguono quasi fedelmente le geometrie dei limiti delle carte dei cinematismi (figura 6). Questi bacini formano due ampie sinformi asimmetriche i cui depocentri raggiungono 2000 m per il Bacino di Savigliano e 3500 m per il Bacino di Alessandria. Studi recenti sottolineano che dal Serravalliano all'Olocene questi Bacini costituiscono settori in continua subsidenza (Dela Pierre et al., 1995).

Questi bacini sono separati da un alto strutturale (Biella et al., 1997 chiamato informalmente alto di Asti) legato allo sviluppo di un thrust sepolto nord vergente attivo dall'Oligocene-Burdigaliano. La corrispondenza geometrica tra il dato geologico e le carte dei cinematismi farebbe supporre che il sollevamento in superficie registrato dai PS sia dovuto alla crescita dell'anticlinale associata all'attività tettonica attuale del thrust sepolto.

Sulla base di questa corrispondenza geometrica tra le carte ottenute dall'analisi statistica si ritiene che i limiti di questi areali possano essere interpretati come evidenze statistiche di strutture tettoniche che svincolano blocchi crostali a differente cinematismo la cui mobilità risulterebbe attuale (figura 6).

In conclusione, l'utilizzo di analisi statistiche in contesto spaziale rappresenta uno strumento di approccio idoneo per lo studio a scala regionale di domini geologici a differente cinematismo.

Il proseguo del progetto sarà rivolto da un lato ad affinare il quadro delle conoscenze sulla neotettonica regionale, dall'altro a verificare l'efficacia del metodo di analisi proposto.

Riferimenti bibliografici

Biella G. C., Gelati R., Maistrello M., Mancuso M., Masiotta P. e Scarascia S. (1987), The structure of the upper crust in the Alps-Apennines boundary region deduced from refraction seismic data.

Tectonophysics, 142, 71-85.

Davis J. C. (1986), *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley and Sons, New York

Dela Pierre F., Mikhailov V. e Polino R. (1995), The tectonosedimentary evolution of the tertiary basins in the Western Po plain: kinematics inferred from subsidence curves. *Acc. Naz. Sci., Scritti e Doc.*, 14, 129-146.

Laubscher H. Biella G. C., Cassinis R., Gelati R., Lozej A., Scarascia S., and Tabacco I. (1992) - The collisional knot in Liguria. *Geol. Rund.* 81, 275-293.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001) "Permanent scatters in SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 : 1, 8-20.

Getis A., Ord J.K. (1992) "The analysis of spatial association by use of distance statistics", *Geographical Analysis*, 24: 3, 189-206

Ord J.K., Getis A. (1995) Local spatial autocorrelation statistics", *Geographical Analysis*, 27: 4, 286-306

Massa M., Eva E., Eva C. & Spallarossa D. 2007, Studio delle sequenze sismiche 2000 - 2001 dell'area del Monferrato (Piemonte, Italia), *Atti del 22° Convegno nazionale GNGTS. Roma, C.N.R., 18-20 Novembre 2003, cdRom, 9 pp.*