

ALESSANDRA SAVA (*)

LE FORME LINEARI DA IMMAGINI LANDSAT: UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE ALL'ANALISI GEOMORFOLOGICO-STRUTTURALE IN APPENNINO CAMPANO

ABSTRACT: SAVA A., *Landsat linear features: an example of application to structural-geomorphologic analysis in the Campanian Apennines.* (IT ISSN 0391-9838, 1996).

A linear features analysis was made on the Campanian Apennines in order to study the use of remotely sensed data and field data for structural-geomorphologic analysis. A Landsat image was processed in order to draw a linear features map. A length weighted statistical analysis allowed to recognize 8 trend intervals and prepare the linear features concentration maps. Some of the recognized features were field checked and their associated morphological and structural characters described and dated. The methodology, systematically used and applied at a regional scale, appears to be a good instrument to separate, among the same trend interval, those structures having the same morphological and structural meaning. This could be a way to understand the relationships between landscape modelling processes and the tectonic events that have been affecting the Apenninic Chain since Upper Pliocene.

KEY WORDS: Geomorphology, Remote sensing, Linear features analysis, Campania (Italy)

RIASSUNTO: SAVA A., *Le forme lineari da immagini Landsat: un esempio di applicazione all'analisi geomorfologico-strutturale in Appennino Campano.* (IT ISSN 0391-9838, 1996).

Per studiare le strutture prodotte dalle fasi tettoniche quaternarie nell'Appennino Campano e valutare i caratteri e l'entità del controllo da esse esercitato sulla morfologia, è stata condotta un'analisi comparata tra le forme lineari visibili da satellite e le strutture in molti casi ad esse associate. Utilizzando un'immagine Landsat opportunamente elaborata è stata dapprima ricavata una carta delle forme lineari dell'Appennino Campano. L'analisi statistica delle loro orientazioni, effettuata in maniera pesata in funzione della lunghezza, ha quindi permesso di riconoscere 8 trend preferenziali e di preparare altrettante carte di concentrazione che ne illustrano la distribuzione areale. Alcune tra le forme lineari riconosciute so-

no state poi oggetto di una verifica di campagna, che ha riguardato sia i caratteri geomorfici, che il tipo di movimento avvenuto lungo le strutture ad esse associate. La metodologia utilizzata, applicata in maniera sistematica e alla scala regionale, potrebbe consentire di distinguere, all'interno degli intervalli di orientazione riconosciuti a distanza, dei sottoinsiemi di forme lineari associabili a gruppi di strutture omogenei per età ed evoluzione morfotettonica. Ciò fornirebbe una chiave di lettura per la comprensione delle relazioni tra i fenomeni di modellamento del paesaggio e i regimi tettonici che hanno governato questa parte della catena appenninica meridionale a partire dal Pliocene superiore.

TERMINI CHIAVE: Geomorfologia, Telerilevamento, Analisi delle forme lineari, Campania.

INTRODUZIONE

L'area studiata appartiene all'Appennino Meridionale, un edificio a falde di ricoprimento la cui genesi viene messa in relazione con la collisione continentale tra le placche africana e sardo-corsa per effetto della chiusura della Tetide giurassica (D'ARGENIO, 1988; D'ARGENIO & *alii*, 1973, fig. 1).

In particolare, nel settore campano della catena oggetto del presente studio, la tetto-genesi ha inizio nel Langhiano con la deformazione dei domini paleogeografici più interni e si prolunga anche al Pliocene superiore e al Quaternario provocando la parziale sovrapposizione delle unità della catena ai sedimenti dell'avanfossa. A partire dal Pliocene superiore si assiste al sollevamento della catena a cominciare dalle zone più interne, mentre procede la subsidenza lungo il margine esterno (Fossa Bradanica) e si verifica contemporaneamente lo sprofondamento delle zone marginali tirreniche. Fenomeni distensivi a carattere regionale causano allo stesso tempo lo smembramento della catena e l'individuazione di un gran numero di strutture di tipo horst e graben. Le dislocazioni plio-quaternarie sono particolarmente evidenti lungo il margine tirrenico dell'Appennino dove delimitano, con faglie subverticali con rigetti talvolta superiori a 4 000 m, le piane costiere (bacini del Garigliano, del Volturno e del Sele, in cui si sono accumulati note-

(*) Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università di Napoli «Federico II».

L'autrice ringrazia i proff. L. Brancaccio, del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Napoli «Federico II», e A. Zuppetta, del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Benevento, per la lettura critica del manoscritto.

Lavoro pubblicato con i contributi M.u.r.s.t. 60% e 40% (Resp. prof. A. Zuppetta).

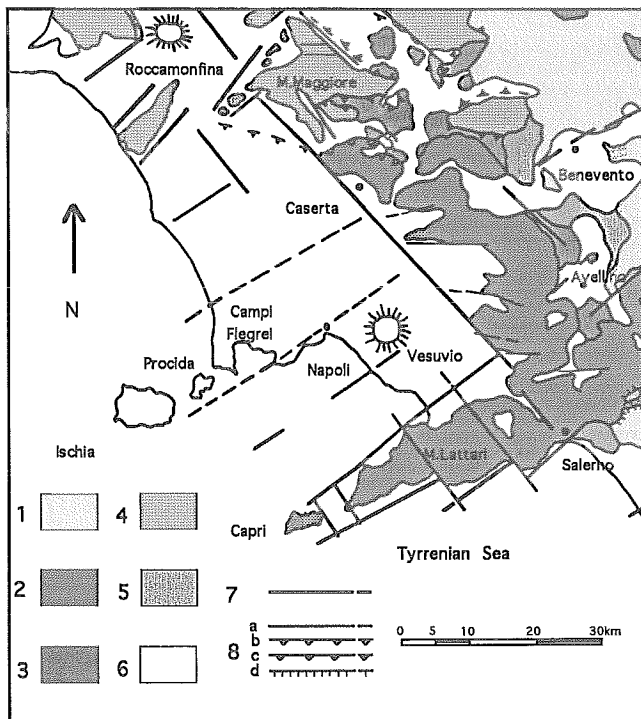


FIG. 1 - Carta geologica schematica dell'area campana: 1) Unità Sicilidi, 2) Unità Alburno-Cervati e Monte Bulgheria-Verbicario, 3) Unità Irpine, 4) Unità Monte Maggiore, 5) Unità di Altavilla, 6) Sedimenti quaternari, 7) Faglie plio-pleistoceniche, 8) Strutture mioceniche: a) faglie normali, b) faglie inverse, c) sovrascorrimenti tortoniani, d) sovrascorrimenti langhiani (da IPPOLITO & alii, 1975 modificata).

FIG. 1 - Geologic sketch map of the Campanian area: 1) Siciliadi Units, 2) Alburno-Cervati and Monte Bulgheria-Verbicario Units, 3) Irpinian Units, 4) Monte Maggiore Unit, 5) Altavilla Unit, 6) Quaternary sediments, 7) Plio-Pleistocene faults, 8) Miocene structures: a) normal faults, b) reverse faults, c) Tortonian thrusts, d) Langhian thrusts (from IPPOLITO & alii, 1975, modified).

voli spessori di sedimenti marini, transizionali, continentali e vulcanici) e le coste alte (Penisola Sorrentina e Cilento), nonché i canyons sottomarini Dohrn e Magnaghi nel Golfo di Napoli.

Le strutture attualmente presenti in Appennino non sono sempre facilmente riconoscibili né attribuibili con certezza alle diverse fasi tettoniche. PESCATORE & ORTOLANI (1973) suggeriscono di raggrupparle schematicamente in due sistemi principali, uno con orientamento NW-SE (appenninico) e NE-SW (antiappenninico) e l'altro con orientamenti WNW-ESE e E-W. Essi riferiscono le strutture con orientamento appenninico e antiappenninico alle fasi tettoniche plio-quadernarie, in quanto tagliano nettamente tutte le altre e interessano, oltre alle unità più antiche, anche gli stessi depositi plio-quadernari, mentre attribuiscono le restanti alle fasi tettoniche mioceniche. Anche i dati geofisici forniscono l'indicazione della presenza di strutture regionali con orientamento paragonabile a quelle prima descritte (BARTOLE & alii, 1984; CARRARA & alii, 1974; FINETTI & DEL BEN, 1986; FINETTI & MORELLI, 1974; MAINO & alii, 1961). Lo studio di alcuni pro-

filii sismici a riflessione effettuati al largo delle coste campane ha permesso a BARTOLE & alii (1984) l'identificazione del *trend* orogenico miocenico genericamente orientato E-W e delle strutture post-orogene plio-quadernarie NW-SE (appenniniche) e NE-SW (antiappenniniche), considerate dagli Autori come le principali responsabili della attuale morfologia del margine meridionale tirrenico.

La sintesi degli studi tettonici e micro-tettonici effettuati per il Plio-Quadernario sull'Appennino Meridionale e sul Bacino del Tirreno in particolare da GARS (1983) hanno condotto PHILIP (1983) e BOUSOUET & PHILIP (1986) ad attribuire un'età alle diverse fasi deformative che hanno interessato questo settore:

— Pliocene superiore-Quadernario superiore: in questo periodo si assiste ad un'estensione generalizzata che interessa un dominio interamente sommerso, mentre un regime di compressione è presente nella sola Fossa Bradanica. Nelle aree di avanpaese (Puglie) la distensione ha direzione N-S e NE-SW, mentre nelle zone interne si ha un'estensione di tipo radiale.

— Fine del Quadernario inferiore: si assiste al manifestarsi di una breve fase compressiva che interessa in modo particolare la Fossa Bradanica. Tracce di questa fase sono state riscontrate nella Formazione di Eboli, a S del settore studiato (GARS & LIPPMANN, 1984; ZUPPETTA & SAVA, 1992). La direzione di compressione è NE-SW.

— Quadernario recente e attuale: si ha una ripresa della distensione, eccetto che sul fronte della catena. Vengono distinti dagli autori un settore tirrenico, caratterizzato da una distensione NW-SE (parallela alla catena) di tipo *dé-crochmant* analoga a quella messa in evidenza da GARS (1983) e ZUPPETTA & SAVA (1992), e un settore orientale per il quale viene riconosciuta una direzione di estensione NE-SW (perpendicolare alla catena).

Scopo del presente lavoro è quello di studiare le strutture prodotte dagli eventi tettonici quadernari nell'Appennino Campano per valutarne i caratteri e l'entità del controllo da essi esercitato sulla morfologia. Una prima fase di lavoro è consistita nel raccogliere da un'immagine Landsat, opportunamente elaborata, nuovi dati sulle forme lineari presenti nell'Appennino Campano. L'analisi statistica delle forme lineari individuate ha consentito di riconoscere *trend* preferenziali di orientazione associabili a strutture regionali esistenti sia nei terreni carbonatici che all'interno dei terreni sedimentari e vulcanici di età recente. L'analisi comparata tra le forme lineari riconosciute e i caratteri geomorfici ad esse associati ha infine permesso di fornire un contributo alla comprensione delle relazioni tra i fenomeni di modellamento del paesaggio e i regimi tettonici che hanno governato questa parte della catena appenninica meridionale a partire dal Pliocene superiore.

ELABORAZIONE DELL'IMMAGINE LANDSAT

Per lo studio a distanza dell'area campana è stato utilizzato un quarto di scena Landsat Thematic Mapper (TM), ottenuto presso l'EROS Data Center, South Dakota (U.S.A.) ed elaborato presso il Remote Sensing Laboratory dell'U.S.G.S. di Reston - Virginia (U.S.A.). La scena sele-

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

(a)

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

(b)

2	0	-2
4	0	-4
2	0	-2

2	4	2
0	0	0
-2	-4	-2

(c)

Fig. 2 - a) Matrice filtro non-direzionale selezionata. Come si può vedere il valore centrale è uguale a 5. b) e c) Coppie di filtri direzionali che hanno fornito i migliori risultati nell'elaborazione. I valori delle matrici filtro sono stati in qualche caso aumentati per incrementarne il peso e renderne più marcato l'effetto, come si può osservare in c).

Fig. 2 - a) Non-directional filter kernel used for image processing. The central value chosen is 5. b) and c) Directional filter kernel sets. The set in c) shows higher values and was used to stronger enhance the features in the image.

zionata è stata acquisita il 17 Aprile 1987 e risulta praticamente priva di copertura nuvolosa. Delle sette bande spettrali del sensore TM sono state prese in considerazione le sei dotate di una risoluzione al suolo di 30x30 m: 1, 2 e 3 nel dominio del visibile e 4, 5 e 7 nell'infrarosso riflesso. La banda 6, caratterizzata da una frequenza che ricade nel dominio dell'infrarosso termico, è stata subito scartata in quanto dotata di una risoluzione inferiore (120x120 m). Ai fini dello studio delle forme lineari sono state poi selezionate le bande 4, 5 e 7, in quanto meno affette da fenomeni di scattering atmosferico.

La scena è stata oggetto di numerose elaborazioni, effettuate utilizzando diverse tecniche di *enhancement*, con lo scopo di incrementare le differenze tonali ed evidenziare così la presenza di forme lineari. Un primo tipo è consistito nel *contrast stretching*. Per valutare quale fosse il più idoneo, ne sono stati realizzati tipi diversi (*lineare, equalizzazione, Gaussiano*) (DRURY, 1987; SABINS, 1987). Ai fini del presente studio, una equalizzazione è risultata la più efficace tra i *contrast stretching* utilizzati. Non a caso questa tecnica è infatti quella che più di tutte determina un aumento del contrasto.

L'immagine prodotta dall'operazione di *stretching* è sta-

ta successivamente elaborata utilizzando dei filtri digitali sia non-direzionali che direzionali. I numerosi filtri non-direzionali sono stati eseguiti utilizzando filtri Laplaciani con valori centrali della matrice filtro (3x3) compresi tra 4 e 7; tra questi, 5 si è dimostrato il valore più idoneo per il trattamento della scena in esame (fig. 2a). Per ottimizzare il risultato, prima di sommare il valore così calcolato al DN del pixel centrale della matrice (3x3) originale si è proceduto a moltiplicarlo per un *fattore peso*. I migliori risultati sono stati ottenuti con fattore peso di 0,2 applicato ad un'immagine già elaborata con una equalizzazione.

Per evidenziare forme lineari con una specifica direzione sono stati infine utilizzati dei filtri direzionali. Questi filtri determinano un aumento del contrasto lungo il limite tra due zone a diversa radianza solo in prossimità della direzione del filtro, mentre nella direzione normale a quella delle forme lineari messe in evidenza si osserva al contrario una diminuzione del contrasto. Per questo si è preferito usare almeno due direzioni di filtraggio normali fra loro. Com'è noto, la scelta delle dimensioni di un filtro direzionale è fortemente condizionata dalla frequenza media con la quale le variazioni di luminosità del segnale raccolto dal sensore si manifestano nell'immagine (SABINS, 1987). Per questo motivo sono stati effettuati numerosi filtri con matrici di dimensioni varie. Filtri di dimensioni 3x3 o al massimo 5x5 si sono alla fine rivelati i più efficaci. I valori assoluti della matrice filtro sono stati in qualche caso aumentati per incrementarne il peso e renderne più marcato l'effetto. La somma dell'immagine filtrata con l'originale è stata infine effettuata sia in rapporto 1:1 che in rapporto 2:1, quest'ultimo usato per attenuare l'effetto di filtri più marcati (fig. 2b e c). Il risultato di uno dei filtri che ha fornito i migliori risultati viene mostrato in figura 3.

ANALISI STATISTICA DEI LINEAMENTI

Lo studio delle forme lineari è stato condotto secondo la procedura proposta da SAWATZKY & RAINES (1981). L'intera procedura di analisi consiste in tre fasi prodotte indipendentemente e sequenzialmente: raccolta dati, analisi statistica delle forme lineari e analisi geologica.

— La raccolta dati, che consiste nella fotointerpretazione di un'immagine telerilevata dell'area da esaminare elaborata per questo scopo, è soggettiva e conduce alla preparazione della carta delle forme lineari;

— l'analisi statistica, parte oggettiva della procedura, ha due obiettivi: individuare i *trend* direzionali significativi ed elaborare carte di concentrazione delle forme lineari;

— l'analisi geologica consiste nell'interpretazione dei risultati ottenuti nelle fasi precedenti, valutandoli anche alla luce di quanto di quell'area si conosce da altre fonti (geologia di campagna, dati geofisici, sondaggi, etc.).

Nella fase di raccolta dati vengono tracciate tutte le forme lineari riconoscibili sulle immagini, con l'ovvia esclusione, ovunque possibile, di tutte quelle artificiali e/o derivanti da modificazioni del paesaggio prodotte dall'uomo. Per questo scopo è molto importante disporre di una cartografia in scala opportuna dell'area analizzata, nonché



FIG. 3 - Landsat TM banda 5. *Edge enhancement* dell'immagine della Piana Campana e zone limitrofe realizzato con l'uso di un filtro non-direzionale. Al filtraggio, effettuato utilizzando un fattore peso di 0,2, è stato associato ad uno *stretching* del tipo *equalizzazione*, con lo scopo di ottenere un generale miglioramento del contrasto prima dell'applicazione del filtro.

FIG. 3 - Landsat TM band 5. *Edge enhancement* of the image by the means of non-directional filtering (weighting factor 0.2). A *uniform distribution stretching* was done before filtering.

possedere una sufficiente conoscenza del territorio. Per mantenere l'oggettività nella fase successiva è inoltre opportuno stabilire, prima di iniziare la raccolta dati, parametri come il valore di significatività e le dimensioni della griglia da adottare per le carte di concentrazione delle forme lineari che verranno realizzate in seguito.

Nella fase successiva la carta prodotta viene digitalizzata, ottenendo un *file* in cui le forme lineari sono espresse sotto forma di coordinate bidimensionali dei punti estremi di segmenti rettilinei. I dati sono poi analizzati con l'ausilio di diversi programmi di calcolo. Per prima cosa vengono determinati i *trend* direzionali con un programma di analisi specifica. Successivamente sono prodotte carte di concentrazione delle forme lineari, che consistono nel *contouring* di uno o più d'uno tra i *trend* direzionali individuati.

L'esperienza acquisita ha dimostrato che le carte prodotte con questa procedura di *contouring*, che usa *trend* definiti statisticamente, è spesso in grado di evidenziare particolari concentrazioni associabili a strutture di particolare significato geologico altrimenti disperse nella massa dei dati presenti in una carta.

Nell'ultima fase, i risultati statistici e le carte prodotte nella fase precedente vengono integrati con tutti i dati geologici disponibili per la regione. La carta delle forme lineari (fig. 4) è stata ottenuta dalle immagini Landsat elaborate utilizzando degli ingrandimenti fotografici in scala 1:100.000, la stessa delle carte geologiche disponibili, per effettuare il confronto con le strutture riportate nei Fogli della Carta Geologica d'Italia. Tutte le forme lineari in essa rappresentate sono state poi digitalizzate per l'analisi statistica.

FIG. 4 - Carta delle forme lineari riconosciute nell'area campana, tracciata utilizzando stampe fotografiche dell'immagine elaborata in scala 1:100.000.

FIG. 4 - Linear features map of the Campanian area, from photo prints of the processed image at 1:100.000 scale.

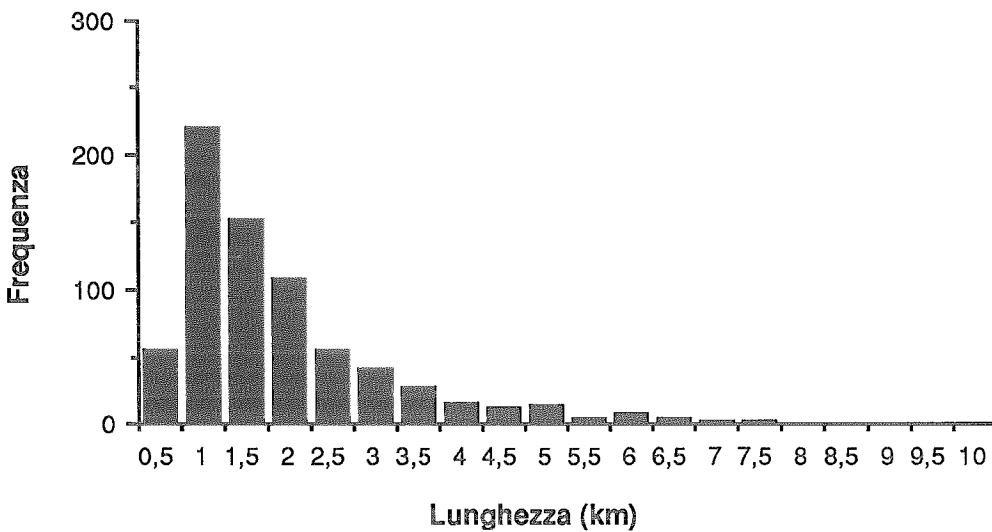
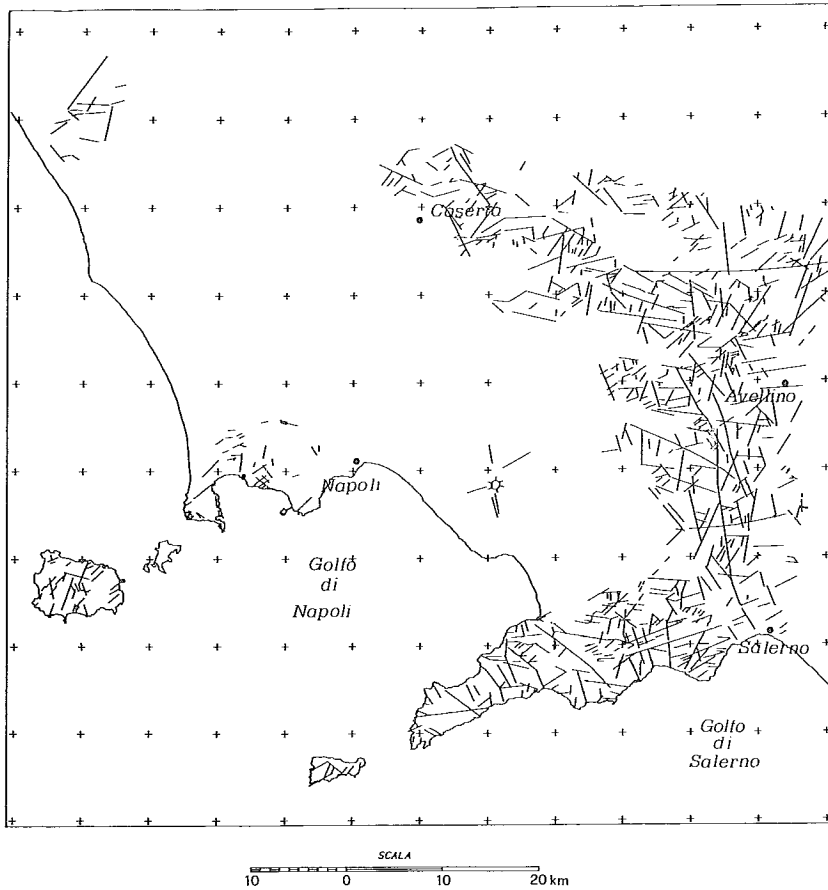


FIG. 5 - Istogramma lunghezza/frequenza delle forme lineari riconosciute nell'immagine elaborata. Come si può osservare la frequenza decresce con la lunghezza, eccezion fatta per le lunghezze minori.

FIG. 5 - Length/frequency histogram of the linear features mapped on the processed image.

Prima di procedere all'analisi vera e propria è stato realizzato un istogramma lunghezza/frequenza. Come si vede in figura 5 la frequenza delle forme lineari decresce con la lunghezza, eccezion fatta per le lunghezze minori. Questa anomalia, spesso riscontrata quando vengono utilizzate im-

magini Landsat, è generalmente attribuita alla risoluzione del sistema, ma potrebbe anche essere correlata con la qualità dell'immagine o con la scala usata per l'analisi (KNEPPER, 1979 e 1985). Per questa ragione si è preferito escludere dalle elaborazioni successive quelle forme di lunghez-

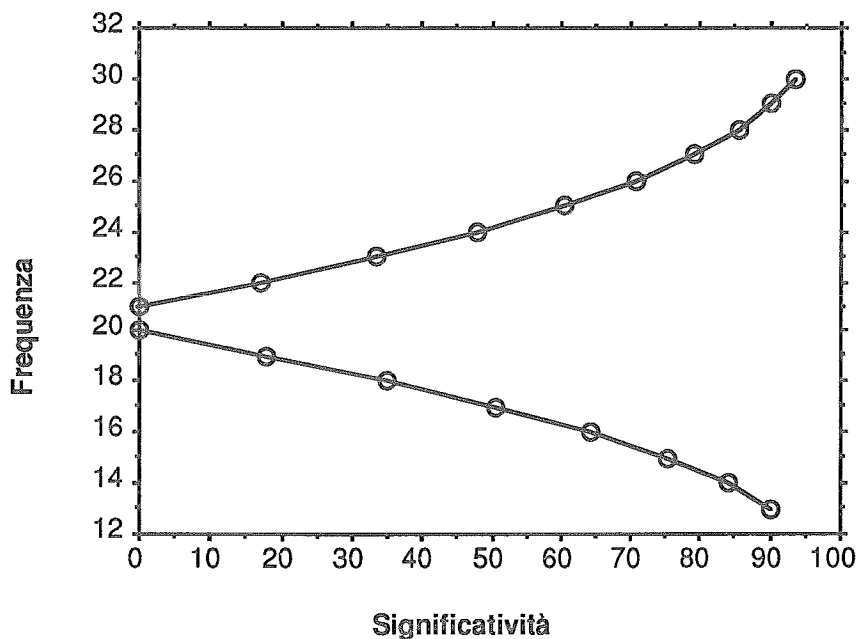
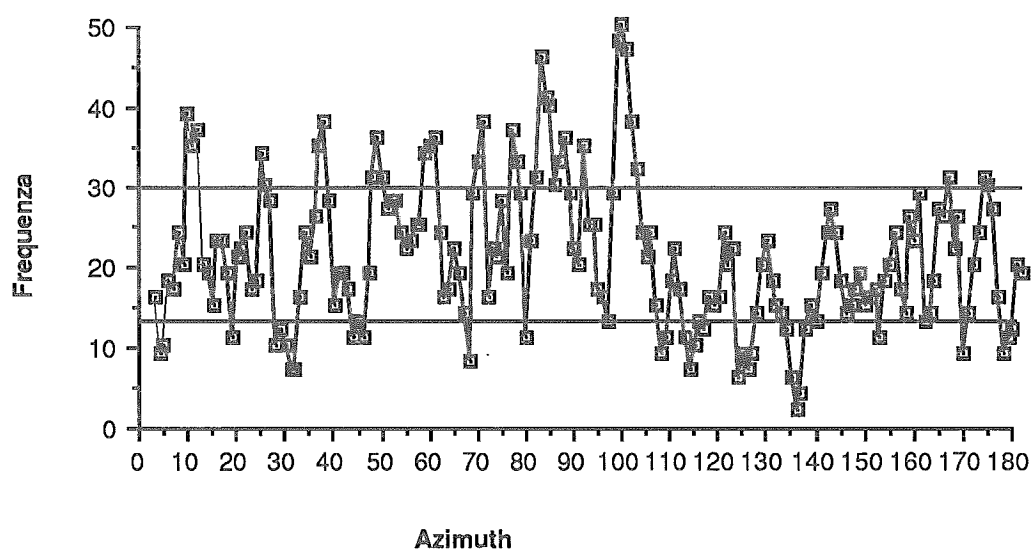


FIG. 6 - Diagramma di significatività ottenuto dall'analisi statistica delle orientazioni delle forme lineari riconosciute nell'immagine.

FIG. 6 - Significance diagram from the statistical analysis.

FIG. 7 - Diagramma direzione/frequenza delle forme lineari. Le due linee orizzontali rappresentano i valori di frequenza al disopra e al disotto dei quali i massimi e i minimi di frequenza risultano significativi.

FIG. 7 - Azimuth/frequency diagram. The horizontal lines mark the minimum and maximum significant frequency values calculated for the data set.



za inferiore ai 0,5 km, evitando così di alterare la qualità dei dati.

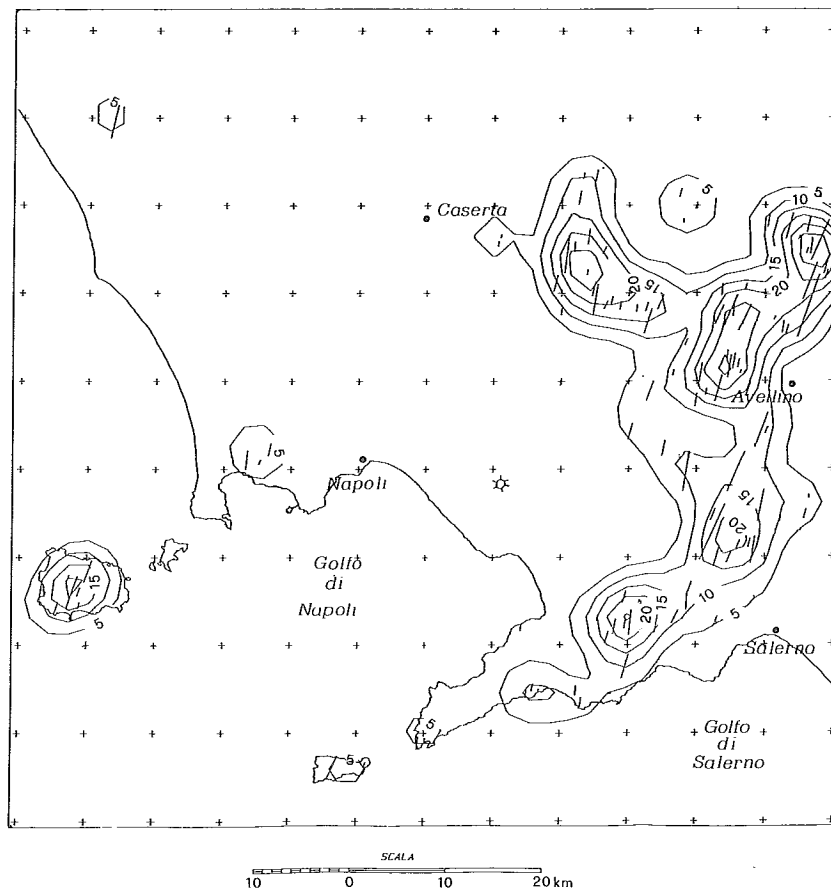
La determinazione di uno o più *trend* significativi si basa sull'analisi dell'istogramma direzione/frequenza, dal quale si ricava la frequenza assoluta dei segmenti lineari analizzati in ognuna delle direzioni azimutali possibili. L'interpretazione convenzionale di un istogramma di questo tipo è che le direzioni modali rappresentino i *trend* principali. Gli Autori estendono il concetto di significatività includendo sia i massimi (le mode) che i minimi, mettendoli in relazione con un valore intermedio tra le frequenze maggiori e le minori. I minimi e i massimi più vicini a questo valore intermedio risultano dotati di una significatività inferiore rispetto a quelli da esso più lontani. L'istogramma si basa sulla frequenza delle forme lineari in 180 classi di direzione dell'ampiezza di un grado. Nel modello proba-

bilistico proposto, un campione di direzioni di dimensioni note viene selezionato a caso all'interno di una popolazione avente uniforme distribuzione (uguale probabilità) sull'intera gamma di direzioni possibili. La distribuzione delle frequenze possibili è binomiale e la sua media è costituita dal valore intermedio sopra menzionato.

I valori di significatività (da non confondere con il livello di significatività, ampiamente usato in statistica) delle frequenze costituenti i massimi e i minimi sono basati sulla differenza tra la probabilità della loro reale frequenza e quella del valore più probabile in assoluto (ad esempio la media). Un valore di frequenza corrispondente o prossimo alla media uniforme di frequenza avrà un basso valore di significatività e verrà denominato poco significativo. Un valore di frequenza con una grande differenza di probabilità rispetto al valore medio sarà

FIG. 8 - *Contour* delle forme lineari appartenenti all'intervallo $N4^{\circ} - 25^{\circ}$.

FIG. 8 - *Contour* of the $N4^{\circ} - 25^{\circ}$ linear features trend.



dotato di un alto valore di significatività e verrà in particolare considerato altamente significativo se questo valore è maggiore o vicino al 90-95%. Un valore di frequenza significativo può perciò trovarsi indifferentemente in corrispondenza di un massimo o di un minimo in un istogramma di frequenza. Il metodo risulta ugualmente valido nel caso in cui all'istogramma venga applicato uno *smoothing* di ampiezza azimutale prefissata con il metodo delle medie mobili. Va sottolineato che questo test di significatività è basato sulla probabilità delle sole frequenze. La significatività di un intervallo di classe non è messa in relazione con la sua posizione o con le sue dimensioni. Per questa ragione, per determinare i *trend* direzionali, vengono usati dei criteri aggiuntivi. I *trend* direzionali sono definiti, attraverso l'analisi dell'istogramma direzione/frequenza, come espressi da uno o più massimi compresi tra almeno due minimi significativi per un determinato valore di significatività. Valori di significatività intorno al 90-95% sono generalmente i più idonei.

Lo stesso modello viene utilizzato anche per individuare *trend* significativi con l'analisi pesata in funzione della lunghezza. In pratica ogni forma lineare, che in precedenza contribuiva con un incremento unitario all'istogramma direzione/frequenza, ora contribuisce con un incremento proporzionale alla sua lunghezza. Raramente *trend* direzionali

rivelati dall'analisi non-pesata scompaiono in quella pesata in funzione della lunghezza. Più frequentemente accade invece che se ne riveli uno nuovo, determinato da pochi segmenti molto lunghi. Nel caso specifico, con un limite di probabilità di 0,97, i massimi risultano significativi al di sopra di un valore di significatività del 93,6%, mentre i minimi lo sono oltre il 90,1% (fig. 6). L'analisi è stata inoltre del tipo pesato.

In figura 7 viene riportato il diagramma direzione/frequenza relativo alle forme lineari individuate nella Piana Campana. Al diagramma originale è stato applicato uno *smoothing* azimutale percentuale di 1,67 gradi per ridurre la differenza tra classi di frequenza adiacenti e mettere così in risalto *trend* altrimenti difficilmente riconoscibili. Effettuare uno *smoothing* dell'istogramma lunghezza/frequenza è generalmente molto utile, specialmente quando esistono grandi differenze tra classi di frequenza adiacenti. Esso mette particolarmente in evidenza *trend* azimutali molto ampi, altrimenti nascosti, effetto che risulta più intenso per i massimi e i minimi di ampiezza più grande del doppio dell'intervallo di *smoothing*. Uno *smoothing* coerente con il modello utilizzato si ottiene calcolando la somma rispetto alla lunghezza di due o più classi contigue e creando una nuova classe al centro dell'intervallo usato. Nell'applicazione di questa tecnica è importante la scelta di un in-

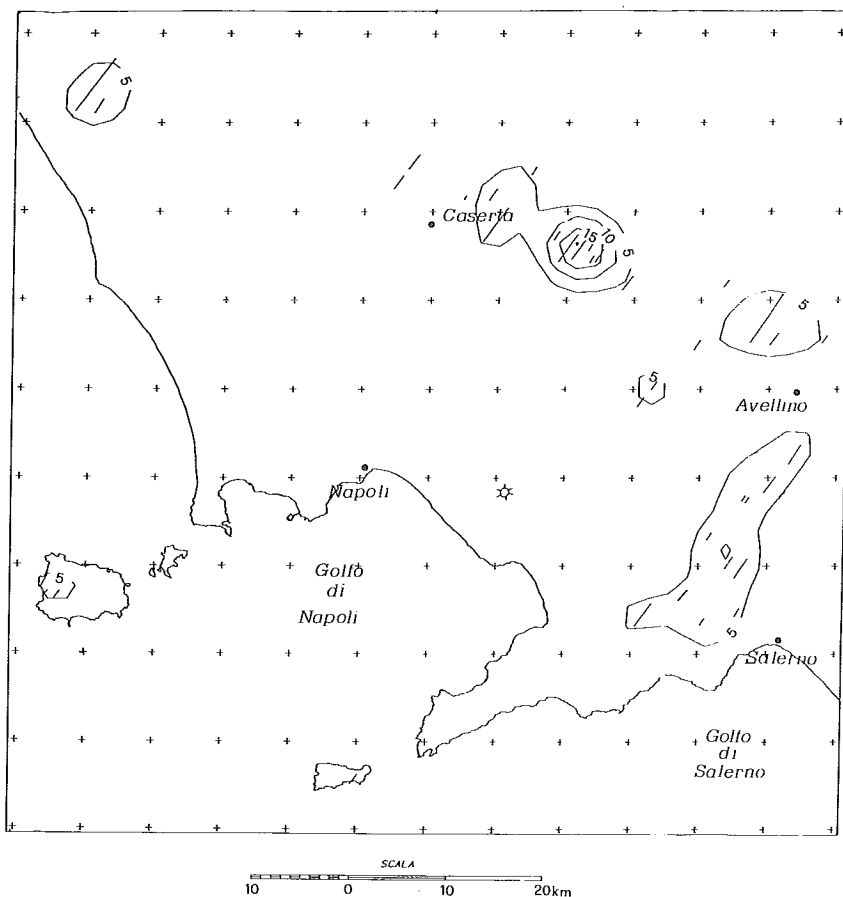


Fig. 9 - Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N31°- 41°.
 FIG. 9 - Contour of the N31°- 41° linear features trend.

TAB. 1 - Intervalli azimutali dei trend individuati per le forme lineari nell'area campana. Sono anche riportati l'ampiezza e i valori massimi di frequenza di ogni singolo intervallo

TAB. 1 - Azimuth interval, width and maximum frequency of linear features trends

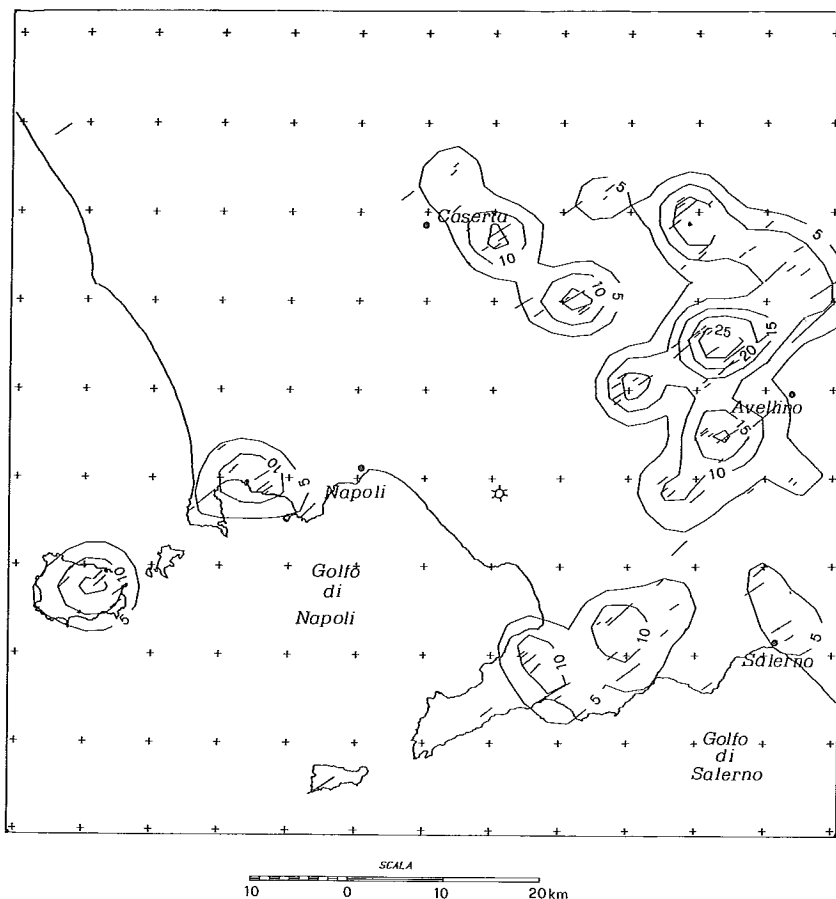
Intervallo azimutale (°)	Ampiezza (°)	Frequenza massima
4-25	22	38
31-41	11	37
45-64	20	35
67-77	11	37
80-94	15	45
96-105	10	49
139-143	5	28
162-175	14	30

tervallo. Negli istogrammi privi di *smoothing* a bassa frequenza totale una frequenza uguale a zero non è infatti significativa. D'altro canto, nel caso di intervalli troppo ampi, le frequenze più alte avranno anch'esse bassa significatività. L'intervallo ottimale è quindi quello per cui la frequenza zero ha un valore di significatività maggiore di quello di un valore test preselezionato (ad es.: 95%). Come si vede i dati appaiono più concentrati in direzione E-W con i due massimi assoluti in corrispondenza delle direzioni N81° e N98°. In complesso sono riconoscibili 13 picchi che esprimono 13 massimi significativi, e 15 minimi significativi. In definitiva si possono riconosce-

re 9 intervalli di orientazione espressi da uno o più massimi compresi tra due minimi significativi. Quattro dei *trend* individuati, N162°-167°, N170°-175°, N4°-16° e N18°-25°, sono stati interpretati come due famiglie a direzione N162°-175° e N4°-25°. I *trend* riconosciuti sono stati così raggruppati negli intervalli di orientazione di Tabella 1, dove sono anche riportati i valori massimi di frequenza e l'ampiezza di ogni singolo intervallo. La frequenza massima (49) è stata riscontrata per l'intervallo N96°-105°, mentre il più ampio è risultato l'intervallo N4°-25° (22°) che, come già sottolineato, deriva però dalla combinazione di due *trend* azimu-

FIG. 10 - Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N45°-64°.

Fig. 10 - Contour of the N45°-64° linear features trend.



tali. In tabella viene inoltre riportato, nonostante sfiori soltanto la soglia di significatività, anche l'intervallo N139°-143°. Le forme lineari in esso comprese infatti, pur non essendo numerosissime, sono generalmente lunghe (frequentemente più di 4 km) e in molti casi correlabili ad importanti faglie regionali. Per questa ragione si è pensato di includerlo nella Tabella 1.

Per visualizzare concentrazione e distribuzione delle forme lineari nell'area studiata, non deducibili dalla semplice ispezione dell'istogramma, sono state prodotte carte delle forme lineari e di concentrazione delle forme lineari per le singole famiglie individuate (figg. 8-15).

Dal confronto della carta delle forme lineari dell'area campana (fig. 4) con i Fogli della Carta Geologica d'Italia risulta evidente come la loro distribuzione sia ampiamente correlabile alla competenza dei litotipi affioranti; la più alta concentrazione di forme lineari si riscontra infatti in quelle aree dove affiorano in prevalenza i calcari. La minore concentrazione è stata riscontrata nelle grandi piane alluvionali, dove la densa urbanizzazione e le coltri di detrito derivanti dallo smantellamento dei rilievi circostanti e dall'attività recente dei vulcani campani ricoprono la quasi totalità delle tracce di strutture a carattere regionale ad esse correlabili (BARTOLE & *alii*, 1984; CARRARA & *alii*, 1974; FINETTI & DEL BEN, 1986; FINETTI & MORELLI, 1974; MAINO & *alii*, 1961).

Un elemento interessante che emerge inoltre dalle carte di concentrazione è rappresentato da zone dalla forma allungata caratterizzate da un'alta concentrazione di forme lineari. Questi massimi possono infatti costituire l'espressione di zone di debolezza crostale e le forme lineari ad essi relative essere l'indizio superficiale di strutture profonde.

FORME LINEARI E GEOMORFOLOGIA: CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio svolto con l'ausilio delle immagini da satellite sulle forme ad esse associate può costituire, abbinato ai dati di campagna, uno strumento valido a mettere in luce i legami esistenti tra i pattern lineari riconosciuti a distanza (tab. 1) e le forme ad essi associabili. Le forme lineari mappate da satellite coincidono infatti quasi sempre con precisi indizi geomorfici, seguono segmenti rettilinei di incisioni fluviali o ancora variazioni lineari della vegetazione. Le escursioni effettuate in campagna hanno consentito di verificare che nella maggior parte dei casi esse possono essere definite lineamenti, cioè esprimono strutture geologiche come fratture, piani di faglia o superfici di

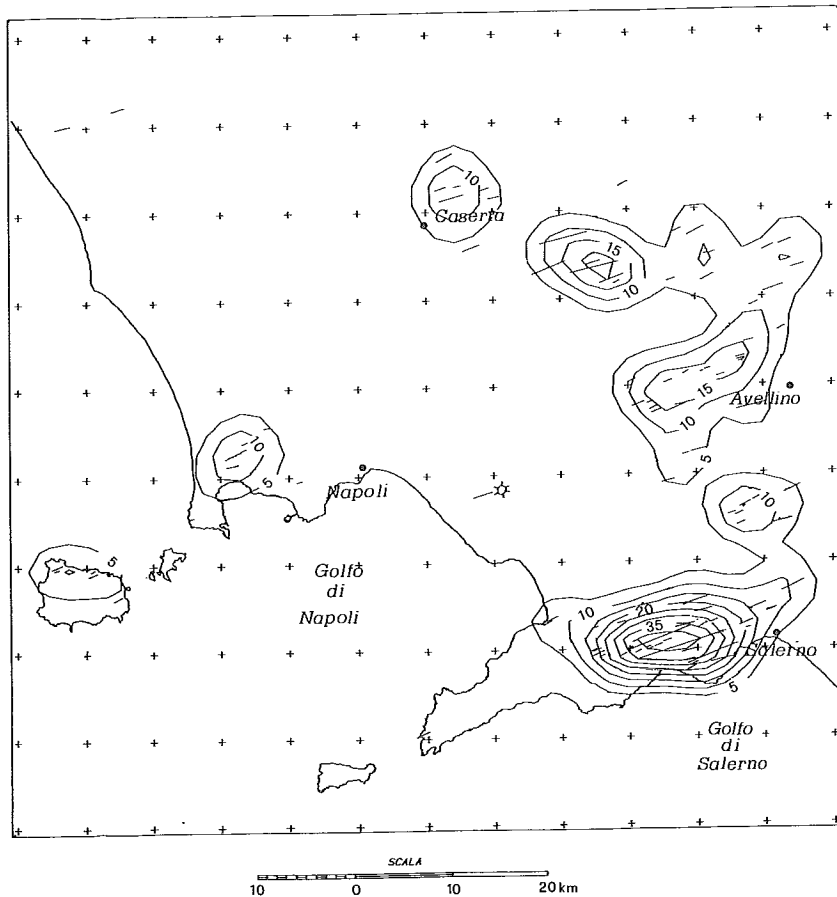


FIG. 11 - Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N67°-77°.

FIG. 11 - Contour of the N67°-77° linear features trend.

contatto. La comprensione della natura e dell'evoluzione geomorfologica delle forme legate a queste strutture può in aggiunta fornire in molti casi delle utili indicazioni sull'età delle strutture stesse e sulle dislocazioni da esse accomodate.

Va innanzi tutto detto che l'analisi statistica delle forme lineari nell'area campana, di tipo pesato in funzione della lunghezza, ha consentito proprio per questo suo carattere peculiare di distinguere nella massa di dati a disposizione numerose strutture di importanza regionale sulle quali indirizzare lo studio di campagna. Ulteriori indicazioni sulla loro distribuzione sono state ricavate dalle carte di concentrazione che hanno fornito dati aggiuntivi circa la localizzazione delle aree di maggiore debolezza strutturale.

Le ricerche svolte hanno portato all'individuazione nell'area campana di un *pattern* lineare complesso. I risultati raggiunti hanno consentito di mettere in evidenza sette intervalli di orientazione alcuni dei quali ricalcano in linea generale l'andamento delle principali strutture tettoniche, desunte dall'analisi statistica delle faglie, che hanno controllato l'evoluzione dell'area campana durante il Plio-Quaternario. Oltre alle classiche orientazioni appenniniche e antiappenniniche, che nella fattispecie ricadono negli intervalli N45°-64° e N139°-148° individuati nel presente studio, sono stati riconosciuti altri trend direzionali tra cui

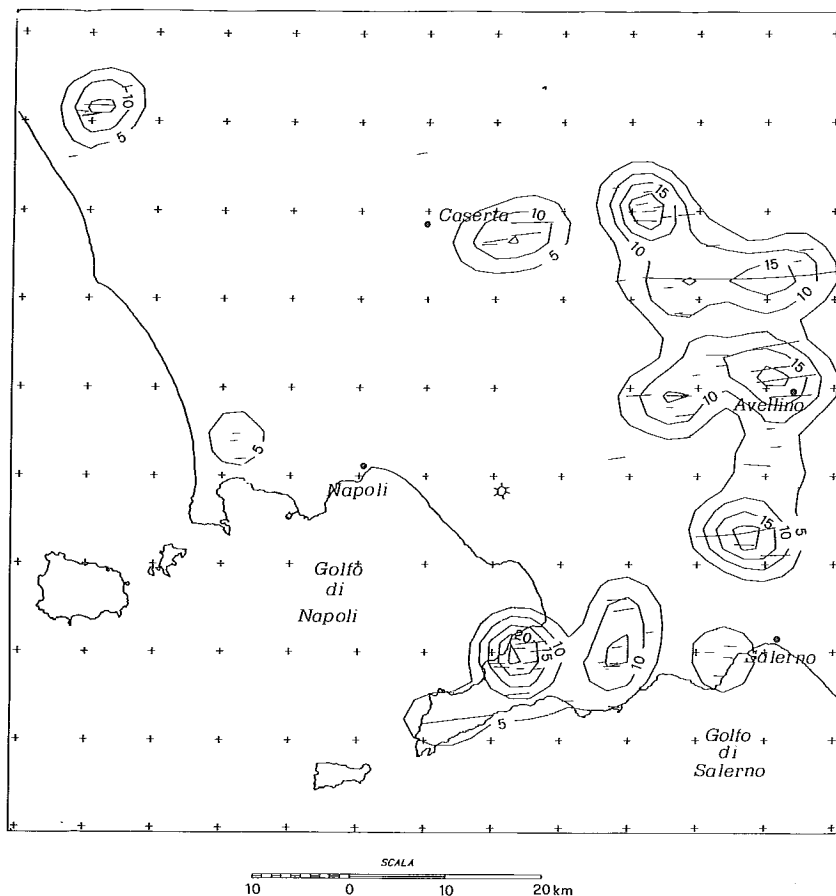
i più significativi appaiono quelli N4°-25°, N31°-41°, N80°-94° e N96°-105°.

Una sostanziale conferma dei valori angolari ottenuti per i trend dei lineamenti è venuta non solo dall'analisi statistica delle direzioni delle faglie (SAVA, 1992) riportate nei fogli della Carta Geologica d'Italia, ma anche dal raffronto con i trend neotettonici individuati da CIARANFI & alii (1983) nell'Appennino Campano. La logica conclusione è che le forme lineari cartografate con le immagini da satellite sono per la maggior parte l'espressione di faglie che hanno dislocato i terreni della catena appenninica. In particolare per l'area Molise-Campania CIARANFI & alii (1983) individuano due intervalli temporali, l'Intervallo IIIb (Pleistocene inferiore) e l'Intervallo IV-V (Pleistocene medio-Attuale), cui riferiscono fasci di strutture orientate rispettivamente NW-SE, NE-SW, E-W e NW-SE, N-S, NE-SW, E-W.

Alcune tra le più importanti di queste strutture corrispondono sul terreno a versanti di faglia che mettono a contatto i calcari mesozoici con i depositi vulcano-sedimentari della Piana Campana e a cui corrispondono importanti strutture regionali attribuite sia all'intervallo IIIb (da 2,0 a 0,7 M.A.) che all'intervallo IV-V (da 0,7 M.A. a oggi). Sui blocchi ribassati di tali strutture di faglia si sono sviluppati in molti casi considerevoli accumuli di detrito, come è accaduto ad esempio lungo il versante a direzione E-W che delimita verso

FIG. 12 - Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N80°-94°.

FIG. 12 - Contour of the N80°-94° linear features trend.



S il Ciglio di Cervinara, o lungo quello NW-SE che borda verso SW Pizzo d'Alvano, o ancora in corrispondenza dei due versanti NE-SW che delimitano il M. Massico verso NW e SE. Tali accumuli, la cui genesi è legata alle condizioni climatiche periglaciali tipiche dei periodi freddi del Quaternario, frequentemente risultano dislocati nel corso delle successive fasi tettoniche, indicando il perdurare dell'attività lungo queste direttrici tettoniche. Viene attribuita all'intervallo IIIb anche l'importante faglia sub-verticale a direzione NE-SW che individua il blocco di Anacapri sull'Isola di Capri (fig. 16). Questa struttura, che coincide con un versante di faglia piuttosto acclive, ha agito smembrando l'ampia paleosuperficie ben conservata ad una quota media di 500 m s.l.m. (terrazzi di 1° ordine) alla sommità del blocco di Anacapri. Lungo il versante è inoltre riconoscibile, alla quota di 150-300 m s.l.m. (terrazzi di 2° ordine), una superficie terrazzata a sua volta interessata da faglie più recenti che hanno controllato le attuali falesie corrispondente al terrazzo marino di Caprile. La superficie terrazzata risulta in parte scavata in roccia (terrazzo di abrasione marina) e in parte interessa delle puddinghe marine di età non definibile, ma certamente successive alla fase tettonica che ha smembrato la paleosuperficie. L'elemento cronologico certo che in questo caso emerge è legato al limite inferiore del terrazzo di Caprile, per il quale è sta-

ta ricostruita un'età pre-tirreniana sulla base di quanto noto sull'età delle faglie recenti che lo dissecano. Sulle falesie strutturali è infatti possibile seguire per lunghi tratti, sempre ad una quota di 8 m circa s.l.m., una linea di costa tirreniana che permette di attribuire alle faglie ad esse associate un'età sicuramente pre-tirreniana (BARATTOLO & *alii*, 1993).

Esclusivamente all'intervallo temporale IV-V viene invece attribuito il sistema di faglie NW-SE che individua la struttura del graben di Sorrento. Sulla superficie di faglia della più importante di esse, la faglia di Meta, le indagini di campagna hanno permesso di rilevare la presenza di strie ad alto angolo di *pitch*.

Ad entrambi gli intervalli temporali viene inoltre attribuita l'attività esplicitasi in corrispondenza delle strutture NW-SE e NE-SW che delimitano su ambedue i lati la Valle del Fiume Volturno e lungo cui sono impostati i corsi dei suoi principali affluenti.

Per quanto riguarda il significato cinematico, tutte le strutture descritte vengono quasi sempre interpretate come faglie normali, con la sola eccezione di alcune delle superfici a direzione NW-SE cui, nella parte iniziale dell'intervallo IIIb, viene attribuito un probabile movimento inverso. A tal proposito, giova qui precisare che non sempre è risultato facile stabilire i movimenti relativi accomodati dalle

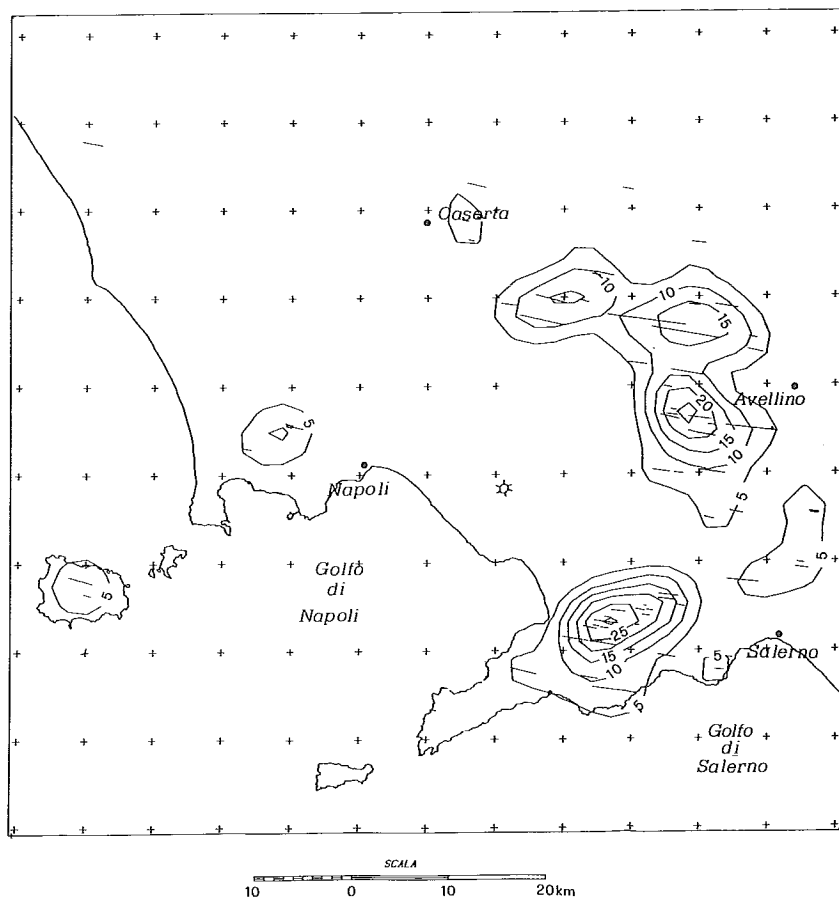


FIG. 13 - Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N96°-105°.

FIG. 13 - Contour of the N96°-105° linear features trend.

strutture fragili per effetto degli eventi tettonici plio-quadernari. Questo emerge con chiarezza anche dai dati da me raccolti in campagna: su molte delle superfici di faglia ispezionate sono state misurate infatti strie con angoli di pitch sensibilmente diversi tra loro, dati che stanno a indicare come le stesse strutture abbiano accomodato più di una dislocazione tettonica.

È da sottolineare che recentemente SAVA (1992) e ZUPPETTA & alii (1993) hanno legato il pattern di strutture osservato nell'Isola d'Ischia ad una tettonica regionale *strike-slip* destra controllata da faglie maestre NW-SE, e che strutture con orientazioni e significato equivalenti sono riconoscibili nell'Isola di Vulcano. Se si considera che ad Ischia queste faglie dislocano terreni non più antichi di 150 K.A., si può ragionevolmente ritenere che l'intero pattern di strutture degli Intervalli IV e V, riferito dagli Autori al Pleistocene superiore-Attuale, sia dovuto alla stessa fase tettonica trascorrente destra.

Risulta invece più difficile riferire il pattern strutturale dell'Intervallo IIIb di CIARANFI & alii (Pleistocene inferiore) ad un unico evento tettonico. Se però si utilizzano i risultati ottenuti dagli Autori sui terreni pleistocenici della Piana del Sele (GARS, 1983; LIPPMANN-BAGGIONI & GARS, 1984; ZUPPETTA & SAVA, 1992) si può attribuire la genesi delle faglie normali a direzione NE-SW e ENE-WSW al-

l'evento tettonico che secondo questi Autori ha prodotto nel Pleistocene inferiore-medio una distensione in direzione N338 (σ_3 : 6°/N338). La genesi delle rimanenti strutture potrebbe tentativamente essere messa in relazione con la tettonica *strike-slip* sinistra esplicatasi lungo faglie maestre a direzione appenninica, quali la faglia del Pollino, che hanno accomodato la migrazione dell'Arco Calabro-Peloritano verso SE. È da sottolineare che le famiglie di fratture individuate dai suddetti Autori con l'ausilio di analisi mesostrutturali nei terreni pleistocenici della Piana del Sele hanno direzioni comparabili con i trend calcolati nel presente studio. Le direzioni delle forme lineari intorno E-W e NW-SE sono coerenti infatti con le direzioni delle superfici di faglia generate dalla I Fase neotettonica del Pleistocene (GARS & LIPPMANN, 1984) nei terreni alluvionali della Piana del Sele, mentre quelle con orientazioni rispettivamente intorno NE-SW e ENE-WSW, possono essere messe in relazione con le faglie sviluppatesi per effetto della III Fase neotettonica. È evidente quindi che queste linee strutturali hanno svolto un ruolo importante già durante le fasi tettoniche del Pleistocene inferiore. Esse sono state riprese successivamente per la messa in posto dei prodotti dell'attività vulcanica (vedi p.e. l'allineamento vulcanico Roccamonfina-Presenzano-Sesto Campano localizzato sulla prosecuzione della faglia NE-

FIG. 14 - *Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N139°-143°.*

FIG. 14 - *Contour of the N139°-143 linear features trend.*

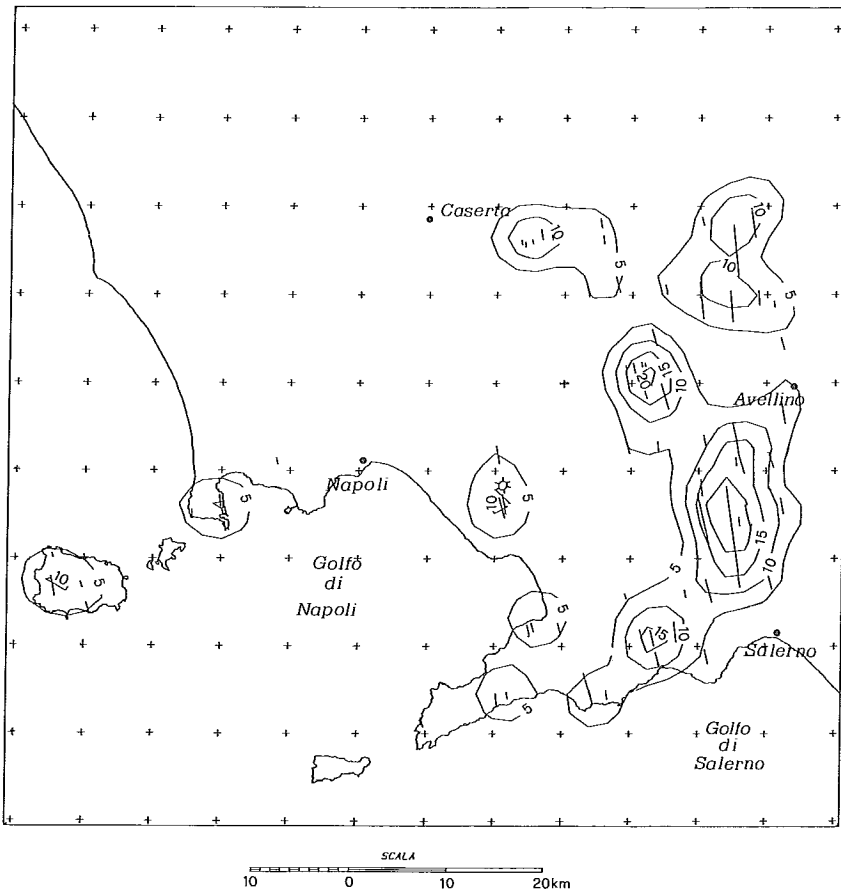
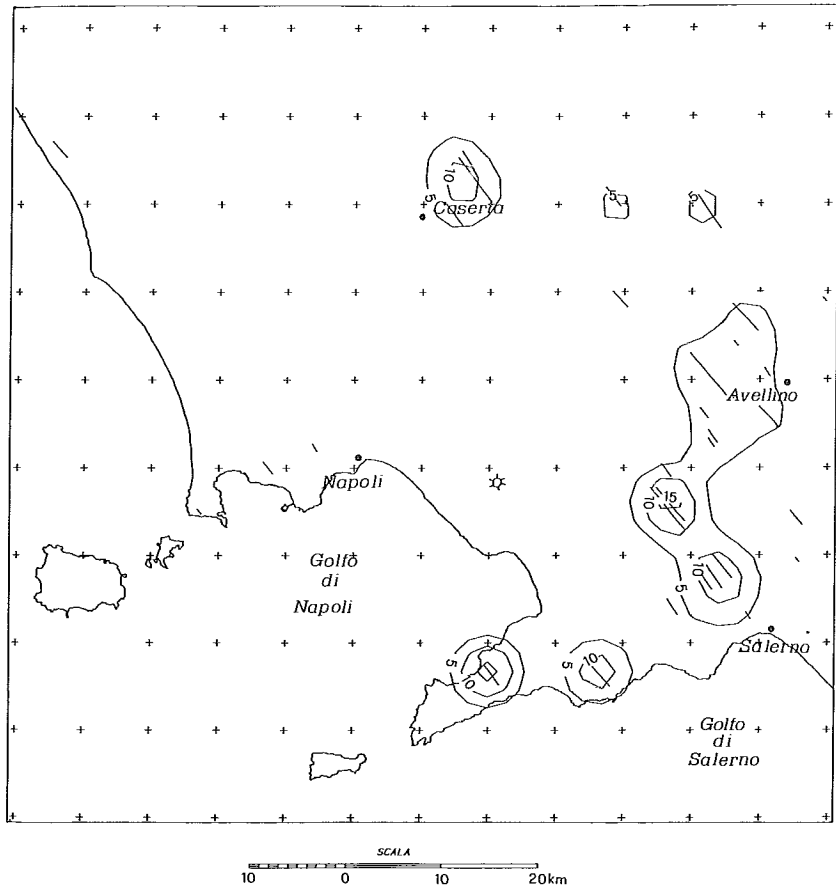


FIG. 15 - *Contour delle forme lineari appartenenti all'intervallo N162°-175°.*

FIG. 15 - *Contour of the N162°-175° linear features trend.*

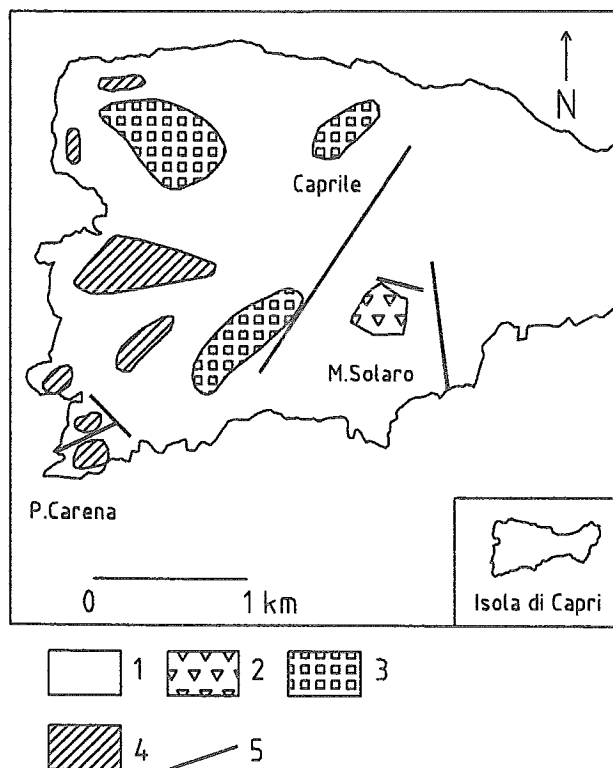


FIG. 16 - Importante faglia normale NE-SW che sull'Isola di Capri disloca il blocco di Anacapri. 1) Mesozoico. Lembi residui delle superfici di spianamento: 2) 1° ordine; 3) 2° ordine; 4) 3° ordine. 5) faglie.

FIG. 16 - NE-SW Anacapri normal fault on Capri Island. 1) Mesozoic terrains. Remains of erosional planes: 2) 1st order; 3) 2nd order; 4) 3rd order; 5) faults.

SW che delimita a nord il Monte Massico), come dimostrano gli studi effettuati da Autori precedenti (ORTOLANI & PAGLIUCA, 1987) e le analisi da me effettuate nella Piana Campana e nell'Isola d'Ischia che sottolineano il parallelismo tra i trend tettonici e alcuni degli allineamenti di apparati vulcanici.

L'elemento principale che emerge dalle analisi effettuate è che la metodologia utilizzata, se applicata in maniera sistematica e alla scala regionale, potrebbe consentire di distinguere, all'interno degli intervalli di orientazione riconosciuti a distanza, dei sottoinsiemi di strutture omogenei per età ed evoluzione morfotettonica. Essa può quindi costituire un valido strumento per la ricostruzione delle fasi che hanno governato l'evoluzione neotettonica di interi settori della catena appenninica campana. Si sottolinea infine che, sulla base dei dati finora raccolti, il significato morfotettonico delle strutture descritte non può essere in alcun modo esteso all'intero intervallo cui esse appartengono.

BIBLIOGRAFIA

BARATTOLO F., CINQUE A., D'ALESSANDRO E., GUIDA M., ROMANO P. & RUSSO ERMOLLI E. (1993) - *Geomorfologia ed evoluzione tettonica quaternaria dell'Isola di Capri*. Studi Geol. Camerti, in stampa.

- BARTOLE R., SAVELLI D., TRAMONTANA M. & WEZEL F.C. (1984) - *Structural and sedimentary features in the Tyrrhenian margin off Campania, Southern Italy*. Marine Geology, 55, 163-180.
- BOUSQUET J.C. & PHILIP H. (1986) - *Neotectonics of the Calabrian Arc and Apennines (Italy): an example of Plioquaternary evolution from island arcs to collisional stages*. In: F.C. Wezel (ed.), *The origin of arcs*, 305-326.
- CARRARA E., IACOBUCCI F., PINNA E. & RAPOLLA A. (1974) - *Interpretation of gravity and magnetic anomalies near Naples, Italy, using computer techniques*. Bull. Volcanol., 38(2), 1-10.
- CIARANFI N., GHISETTI F., GUIDA M., IACCARINO G., LAMBIASE S., MIERI P., RAPISARDI L., RICCHETTI G., TORRE M., TORTORICI L. & VEZZANI L. (1983) - *Carta neotettonica dell'Italia meridionale*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl. 515.
- D'ARGENIO B. (1988) - *Appunti geologici introduttivi alla escursione attraverso l'Appennino Campano-Lucano*. In: *L'Appennino Campano-Lucano nel quadro geologico dell'Italia meridionale*. Guida all'escursione del 74° Congresso Nazionale della S.G.I., Sorrento 13-17 Settembre, 13-39.
- D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1973) - *Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania e Lucania)*. Atti del Convegno: Moderne vedute sulla geologia dell'Appennino. Acc. Naz. Lincei, Quad. M83, 49-72.
- DRURY S.A. (1987) - *Image interpretation in Geology*. Allen & Unwin, London.
- FINETTI I. & DEL BEN A. (1986) - *Geophysical study of the Tyrrhenian opening*. Boll. Geof. Teor. Appl., 27 (110), 75-155.
- FINETTI I. & MORELLI R. (1974) - *Esplorazione di sismica a riflessione nei Golfi di Napoli e Pozzuoli*. Boll. Geof. Teor. Appl., 16 (62-63), 175-220.
- GARS G. (1983) - *Etudes sismotectoniques en Méditerranée centrale et orientale I - La néotectonique de l'Appennin méridional et le séisme (23 nov. 1980) de l'Ypinia (Italie) II - Les failles activées par les séismes (Fev.-Mars 1981) de Corinthe (Grèce)*. Thèse Univ. Paris Sud.
- GARS G. & LIPPMANN M. (1984) - *Nouvelles données néotectoniques dans l'Appennin campanien (Italie du Sud)*. C.R. Acad. Sc. Paris, 298, sér. II, n° 11, 495-500.
- IPPOLITO F., D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1975) - *Structural-stratigraphic units and tectonic framework of Southern Apennines*. In: C. Squires (ed.), *Geology of Italy*. Earth Sc. Soc. Libyan Arab Republic, Tripoli, 317-328.
- KNEPPER D.H. (1979) - *Linear feature data derived from Landsat images of Southeastern Missouri*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 79-992.
- KNEPPER D.H. (1985) - *Analysis of linear features mapped from Landsat images of the Cascade Range, Washington, Oregon and California*. U.S. Geological Survey Open-file Report, 85-150.
- LIPPMANN-BAGGIONI M. & GARS G. (1984) - *La bordure sud des Monts Picentini: un jalon dans l'évolution neotectonique et paleoclimatique de l'Appennin meridional*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 7, 49-58.
- MAINO A., SEGRE A.G. & TRIBALTO G. (1961) - *Risultati e interpretazioni del rilevamento gravimetrico della zona flegreo-vesuviana e dell'Isola d'Ischia*. Ann. Osserv. Vesuv., 46, 229-253.
- ORTOLANI F. & PAGLIUCA S. (1987) - *Relationships between volcanism and structures in Campania during the Quaternary*. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat. in Napoli, Special Issue.
- PHILIP H. (1983) - *La tectonique actuelle et récente dans le domaine Méditerranéen et ses bordures, ses relations avec la sismicité*. Thèse Univ. Montpellier, France.
- PESCATORE T. & ORTOLANI F. (1973) - *Schema tettonico dell'Appennino Campano-Lucano*. Boll. Soc. Geol. It., 92, 453-472.
- SABINS F. (1987) - *Remote Sensing - Principles and Interpretation*. Second edition, Freeman & C., New York.
- SAVA A. (1992) - *Fotointerpretazione da satellite sull'area di vulcanismo attivo della Campania*. Tesi di Dottorato. Università di Napoli «Federico II», Napoli.
- SAWATZKY E. & RAINES G.L. (1981) - *Geologic uses of linear feature maps derived from small scale images*. Proceed. of Third International Conference on Basement Tectonics, 91-100.
- ZUPPETTA A. & SAVA A. (1992) - *Pleistocene brittle deformation in the Eboli Conglomerates (Sele Plain - Campanian Apennines)*. Boll. Soc. Geol. It., 111, 273-281.
- ZUPPETTA A., SAVA A. & ZUPPETTA C. (1993) - *Evoluzione vulcano-tettonica dell'Isola d'Ischia: un modello per gli ultimi 35 ka di attività*. Boll. Soc. Geol. It., 112, 353-369.