

PIER PAOLO PUTZOLU (*)

L'ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA APPLICATA ALLO STUDIO MORFOTETTONICO DELL'ALTA GARFAGNANA E DELLA LUNIGIANA ORIENTALE (APPENNINO SETTENTRIONALE)

ABSTRACT: PUTZOLU P.P., *The quantitative geomorphic analysis applied to the morphotectonic study of the High Garfagnana and eastern Lunigiana areas (Northern Apennines, Italy)*. (IT ISSN 0391-9838, 1999).

In a sector of the Northern Apennines corresponding to the area between the two tectonic depressions of the High Garfagnana and the Lunigiana some techniques of quantitative geomorphological analysis were applied with the aim of characterising the morphostructural features of the area. The importance that this particular region has in the tectonic evolution is associated with the interaction between the lifting processes of the core complex of the Apuan Alps and the neighbouring graben separated by a displacement with complex structural characteristics.

Calculations of the extensive parameters of the hydrographic network and relief, such as drainage density and relief energy, were associated with the determination of morphometric parameters of the hierarchized hydrographic system on an area of more than 400 km². The existing relationship between development of the hydrographic network and the fracturing systems was deduced from the azimuthal analysis of the fluvial segments divided into the hierarchical order and the relative basins. Analysis of the quantitative data interpreted in areal and linear morphostructural terms showed both the sectorial disequilibria of the differential upliftings and also the chronological variations of the systems of fragile deformation starting from the Middle Pliocene.

An E-W system at present constitutes both the main direction of the shear with dextral mechanism between the two graben and also the northern limit of the Apuan dome, which represents the area with the most rapid uplifting. Progressive anti-clockwise rotations of the azimuthal directions should indicate an analogous rotation of the axis of maximum extension at least until the Lower Pleistocene. Alignments that are significant, but not of univocal interpretation within the present tectonic context, are represented by the ENE-WSW and ESE-WNW directions.

KEY WORDS: Quantitative Geomorphology, Morphotectonics, Garfagnana, Lunigiana (Italy).

RIASSUNTO: PUTZOLU P.P., *L'analisi geomorfica quantitativa applicata allo studio morfotettonico dell'Alta Garfagnana e della Lunigiana orientale (Appennino Settentrionale)*. (IT ISSN 0391-9838, 1999).

In un settore dell'Appennino Settentrionale corrispondente all'area compresa tra le due depressioni tettoniche dell'Alta Garfagnana e della Lunigiana sono state applicate metodologie di analisi geomorfica quantitativa finalizzate a caratterizzare gli aspetti morfostrutturali. L'interesse che la regione riveste nell'evoluzione tettonica è legato all'interazione tra i processi di sollevamento del *core complex* delle Alpi Apuane ed i graben adiacenti separati da uno svincolo dalle caratteristiche strutturali complesse.

I calcoli di parametri estensivi della rete idrografica e del rilievo quali la densità di drenaggio e l'energia del rilievo sono stati associati alla determinazione di parametri morfometrici del sistema idrografico gerarchizzato su un'area di oltre 400 km². Il rapporto esistente tra lo sviluppo del reticolo idrografico ed i sistemi di fratturazione è stato dedotto dall'analisi azimutale dei segmenti fluviali scomposti nell'ordine gerarchico e nei bacini di appartenenza. Le analisi dei dati quantitativi interpretati in chiave morfostrutturale areale e lineare hanno evidenziato sia gli squilibri settoriali dei sollevamenti differenziali e sia le variazioni cronologiche dei sistemi di deformazione fragile a partire dal Pliocene medio.

Un sistema E-W costituisce attualmente sia la direzione principale dello svincolo a meccanismo destro tra i due graben e sia il limite settentrionale del duomo apuano, il quale rappresenta l'area con il più rapido sollevamento. Rotazioni antiorarie progressive delle direzioni azimutali indicherebbero una analoga rotazione dell'asse di massima estensione per lo meno fino al Pleistocene inferiore. Lineazioni significative ma di interpretazione non univoca nel quadro della tettonica attuale sono rappresentate dalle direzioni ENE-WSW e ESE-WNW.

TERMINI CHIAVE: Geomorfologia quantitativa, Morfotettonica, Garfagnana, Lunigiana (Italy)

INTRODUZIONE

L'area di spartiacque compresa tra i bacini dei fiumi Serchio e Magra nell'Appennino Settentrionale costituisce una zona molto articolata da un punto di vista geomorfologico, geologico-strutturale e sismotettonico. I tratti superiori dei due corsi d'acqua scorrono rispettivamente nei solchi vallivi della Garfagnana e della Lunigiana lungo gli assi di due depressioni tettoniche di origine pliocenica. La

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa. Lavoro eseguito nell'ambito del Progetto Murst «Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali» (U.O. Pisa, Resp. Prof. P.R. Federici) e con il contributo del C.N.R. (Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino, Pisa).

Un ringraziamento va rivolto al Gruppo di Geografia Fisica dell'Università di Roma La Sapienza, ed in particolare al Dott. Del Monte per l'ospitalità offerta nel proprio laboratorio.

zona di spartiacque coincide con l'area di svincolo tettonico tra i due graben. Infatti le due depressioni tettoniche della Garfagnana e della Lunigiana hanno gli assi disposti parallelamente alla direzione appenninica NW-SE ma risultano disarticolate di circa 12 km. Un elemento di ulteriore complicazione è costituito dalla presenza, sul bordo meridionale dello svincolo, della struttura *core complex* del nucleo metamorfico delle Alpi Apuane che ha avuto un'evoluzione particolare nell'orogenesi appenninica e che è riconosciuta come un'area in rapido sollevamento e smantellamento. Gli obiettivi fondamentali della ricerca sono stati quelli di fornire dati ed indizi morfoneotettonici utili ad una migliore definizione del modello tettonico dell'area di svincolo tra i graben della Garfagnana e della Lunigiana e di dare un contributo al dibattito sull'efficacia delle metodologie di ricerca quantitativa in geomorfologia.

I tratti superiori del fiume Serchio e del Torrente Aulella, affluente del Magra, delineano il quadro geografico dell'area rispetto alla rete idrografica (fig. 1).

L'alto bacino idrografico del fiume Serchio è delimitato a nord-est dal crinale appenninico principale, a sud-ovest dalle Alpi Apuane e a nord-ovest dall'incerto crinale, posto a circa 900 m, con il bacino lunigianese del torrente Aulella. I sottobacini principali del Serchio in Alta Garfagnana

sono costituiti dal Torrente Acqua Bianca nella porzione occidentale a ridosso del massiccio apuano, dal torrente Gragnana nella porzione centrale e settentrionale e dal Serchio di Sillano nella porzione orientale adiacente al crinale appenninico. Il più esteso dei tre sottobacini è quello del Serchio di Sillano che possiede una forma a triangolo equilatero e che con un'area di circa 45 km² si estende a nord dell'abitato di Piazza al Serchio (538 m s.l.m.). A metà circa dell'asse vallivo del Serchio di Sillano, dove il corso d'acqua comincia a scorrere irregolarmente sulle sue alluvioni e la valle si allarga, troviamo la confluenza con il Serchio di Soraggio, il maggiore tributario di sinistra, caratterizzato nel suo tratto inferiore da una profonda valle rettilinea lunga 2 km e delimitata da versanti a forte acclività. Il Torrente Acqua Bianca, tributario destro del Serchio di Sillano, drena il versante apuano della Garfagnana nel suo tratto superiore. La forma del suo bacino idrografico è trapezoidale e con un'estensione di circa 38 km². Il bacino idrografico del torrente Gragnana è il meno esteso dell'alta Garfagnana con i suoi 25 km² ed ha una forma allungata in direzione NNW-SSE.

Sul versante lunigianese lo studio ha interessato un'area di 75 km² posta a monte della confluenza del torrente Aulella con il torrente Rosaro, suo maggiore affluente di de-

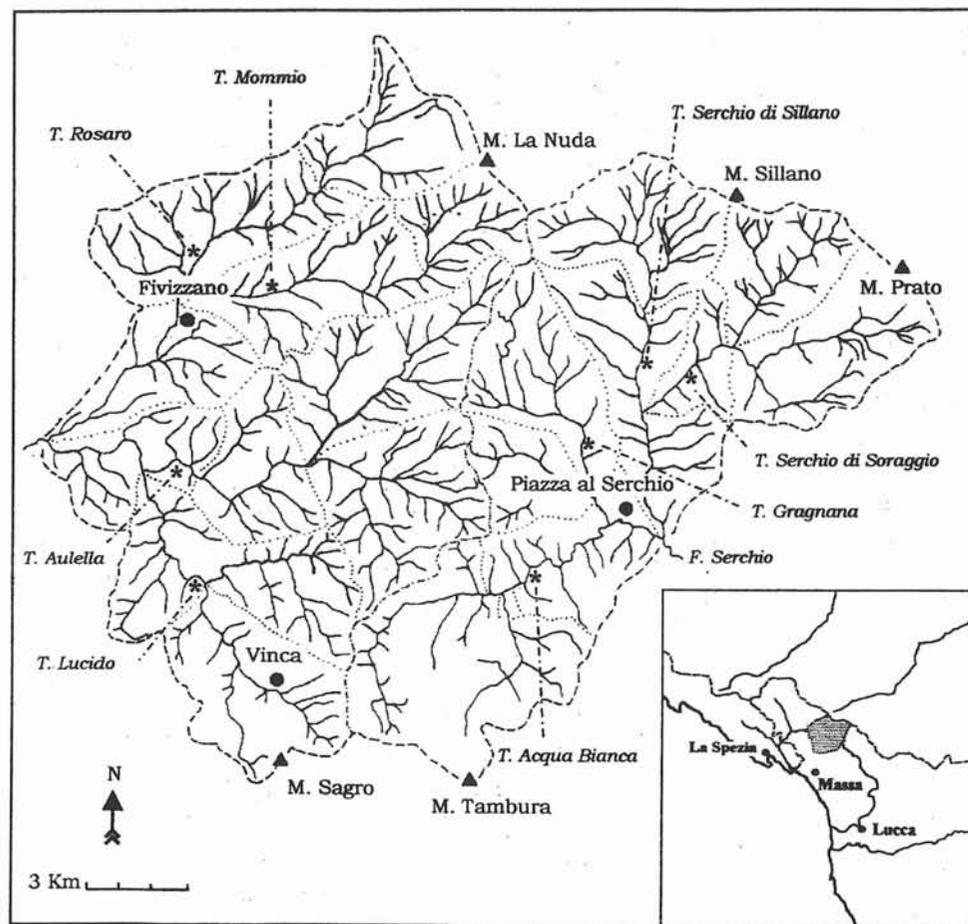


FIG. 1 - Ubicazione dell'area di studio e schema della rete idrografica principale.

FIG. 1 - Location of study area and sketch of the main drainage network.

stra. Nei pressi di Fivizzano il torrente Rosaro riceve l'importante apporto del T. Mommio che drena le pendici meridionali della vetta dominante del M. La Nuda (1895 m) posta sulla cresta appenninica. Il maggiore affluente di sinistra del torrente Aulella è il torrente Lucido che raccoglie le acque superficiali del massiccio apuano sul lato settentrionale. Tale bacino ha un'estensione di circa 34 km² e comprende due affluenti principali che convergono nei pressi di Monzone (226 m s.l.m.) dove la valle principale inferiore si presenta più ampia e con un fondo pianeggiante.

CARATTERISTICHE GEOLOGICO-STRUTTURALI

Nell'ambito della struttura a falde dell'Appennino Settentrionale, le depressioni tettoniche della Lunigiana e della Garfagnana costituiscono due elementi longitudinali paralleli tra loro ma non in asse. Attualmente essi costituiscono due graben interni alla catena formati quasi contemporaneamente dal prevalente regime distensivo instauratosi dopo il Tortoniano superiore. Le unità paleogeografiche e strutturali affioranti nell'area di studio appartengono ai domini epicontinentali della microplacca Adriatica e al dominio del paleoceanico ligure. Le unità tettoniche cui appartengono le trentasei formazioni affioranti sono l'unità ligure di Ottone-S. Stefano, l'unità subligure di Canetolo, la Falda Toscana e l'«Autoctono Apuano».

L'Appennino Settentrionale è stato costruito dall'impilamento verso oriente dei thrust mediante una struttura duplex, per cui le unità più interne del dominio ligure costituiscono le unità tettonicamente più elevate e l'unità più esterna del dominio toscano in posizione strutturale inferiore è quella dell'«Autoctono Apuano». Questi ha subito un metamorfismo in facies di scisti verdi innescato dal carico litostatico della messa in posto della Falda Toscana e delle sovrastanti unità liguri (Carmignani & Kligfield, 1990). Le formazioni metamorfiche dell'«Autoctono Apuano» sono state correlate con criteri lito- e biostratigrafici alle corrispondenti della Falda Toscana.

Tra Minucciano e Cogna si estende, in quattro affioramenti distinti, la formazione dei Ciottolami di M. Lupicino. Sono conglomerati grossolani a prevalenti elementi di «Macigno», costituiti alla base da argille sabbiose del Villafranchiano inferiore e caratterizzati da una sedimentazione sintettonica (Bartolini & Bortolotti, 1971).

La fase compressiva principale dell'Oligocene superiore-Aquitano determinò oltre all'impilamento delle falde derivanti dai domini paleogeografici epicontinentali, la sovrapposizione su queste delle unità liguri ed il seppellimento dell'«Autoctono Apuano» sotto le precedenti unità. In seguito, nel Langhiano è individuato il primo evento distensivo sulla base dei dati strutturali e radiometrici relativi alla fase D2 del complesso metamorfico apuano. In questa fase si realizzerebbe il primo sollevamento e denudamento del complesso metamorfico apuano in una struttura a «Core Complex», con lo sviluppo di pieghe a cascata a simmetria centrifuga che interessano anche la Falda Toscana ai bordi della finestra tettonica che si è formata. Almeno un'altra fase distensiva e di sollevamento avverrebbe poi nel

Serravalliano-Messiniano superiore, in cui le faglie dirette tenderebbero ad esaurirsi a livello delle filladi paleozoiche connesse al passaggio fragile-duttile (Carmignani & alii, 1995). Secondo alcuni Autori la tettonica compressiva avrebbe agito sull'Appennino Settentrionale fino al Tortoniano superiore, dopo il quale iniziarono i processi distensivi connessi all'apertura del Mar Tirreno e come conseguenza dei processi di delaminazione e affondamento della microplacca Adriatica (Patacca & alii, 1990). L'ipotesi è supportata dall'età dei primi depositi sintettonici all'interno dei graben dell'alta valle del Serchio e dell'alta valle del Magra. Negli ultimi anni i dati strutturali regionali indicano la possibilità di un regime compressivo successivo anche al Tortoniano superiore con riattivazioni dei thrust precedenti in strutture fuori sequenza che hanno determinato deformazioni nei bacini sedimentari in rapporto all'attività crostale del settore interno della catena (Boccaletti & Sani, 1998).

Maggiori elementi strutturali

La tettonica fragile post-miocenica pur avendo modificato gli originari rapporti geometrici tra le unità tettoniche non ha cancellato alcune importanti strutture duttili dei thrust che condizionano tuttora le modalità di giacitura delle formazioni presenti, soprattutto sulle Alpi Apuane e nelle aree più marginali rispetto agli assi dei due graben.

Le strutture plicative principali di primo ordine sono individuabili da sud-ovest a nord-est in una serie di anticlinali e sinclinali rovesciate, vergenti verso il settore orientale e con piani assiali ad orientazione variabile. La struttura plicativa di dimensioni chilometriche e di forte evidenza sulla Falda Toscana è rappresentata dal suo fronte costituito da un'anticlinale rovesciata, il cui asse segue parallelamente il crinale appenninico sul versante emiliano. Il fianco diritto affiorante nell'area di studio è prevalentemente costituito da un affioramento di Macigno che si estende a sud-ovest del crinale appenninico per circa 5-7 km. I nuclei carbonatici mesozoici di anticlinali minori della Falda Toscana sono stati esposti ad opera dell'erosione dei torrenti Rosaro, Mommio e Serchio di Soraggio, rispettivamente nei pressi di Sassalbo, Mommio e Villa-Soraggio. Un'altra anticlinale costituita prevalentemente da Macigno è individuabile tra Fivizzano e Uglianaldo nel settore lunigianese. Le maggiori pieghe a scala chilometrica identificate nell'unità ligure di Ottone-S. Stefano sono prevalentemente ampie sinclinali del Flysch ad Elmintoidi.

Le deformazioni fragili della tettonica distensiva seguono nei lineamenti maggiori i bordi delle due depressioni tettoniche, mentre nei lineamenti minori sono complicate anche dai graben e dagli horst secondari differenziatisi all'interno delle strutture principali (fig. 2).

Lunigiana sud-orientale

In Lunigiana il bordo sud-orientale del graben dell'alta valle del Magra è delimitato da un allineamento di faglie dirette, a direzione appenninica, con immersione sud-ovest e comprese tra il M. Bottignana e Regnano. Più esterna-

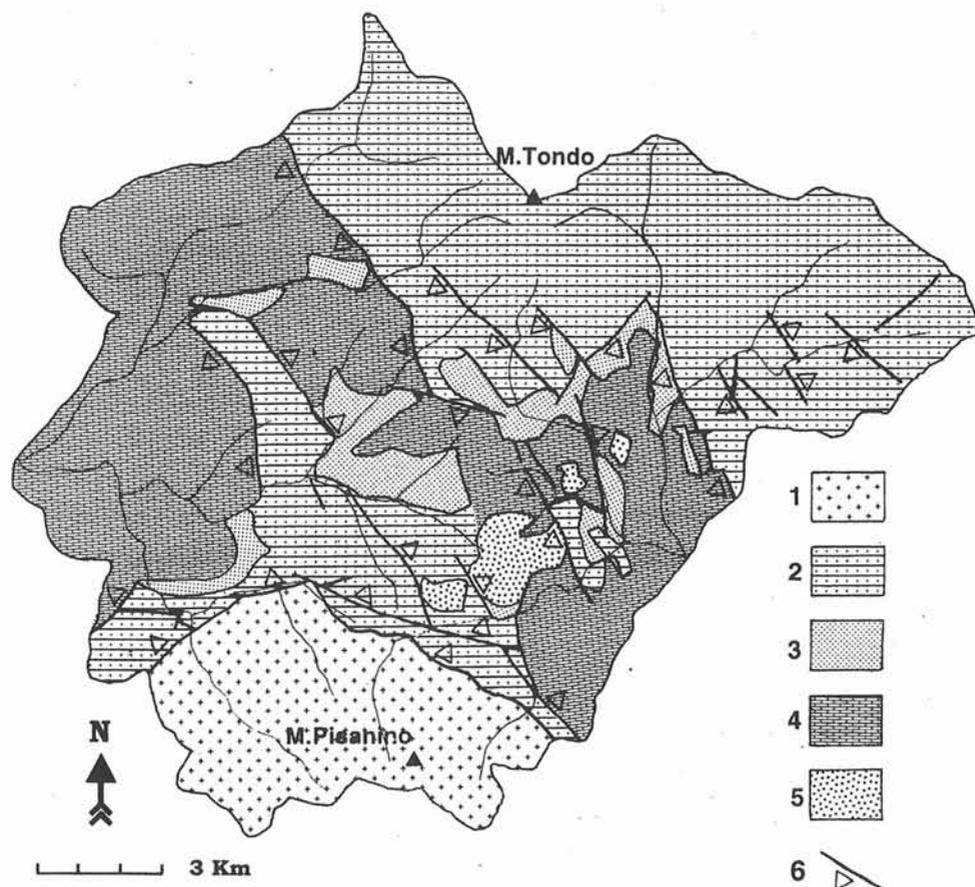


FIG. 2 - Schema geologico strutturale. 1) Complesso metamorfico apuano; 2) Falda Toscana; 3) Unità di Canetolo; 4) Unità di Ottone/S. Stefano; 5) depositi fluvio-lacustri villafranchiani; 6) Faglie principali con lato ribassato.

FIG. 2 - Geological-structural sketch. 1) Metamorphic apuan Complex; 2) Tuscan Nappe; 3) Canetolo Unit; 4) Ottone/S. Stefano Unit; 5) Fluvial-lacustrine villafranchian deposits; 6) Main faults with downthrown side.

mente rispetto all'asse della depressione e con la stessa direzione e immersione delle precedenti sono state cartografate, in modo più incerto, alcune faglie di qualche chilometro di lunghezza (Boccaletti & Coli, 1982). La faglia più meridionale di queste mette a contatto il Macigno con il Flysch ad Elmintoidi e costituisce il bordo sud-occidentale dell'horst di Fivizzano-Turlago. Questa faglia delimita secondo alcuni autori l'area di sprofondamento del bacino villafranchiano di Aulla-Olivola (Federici & Rau, 1980) ed ha un rigetto superiore a 300 m. L'horst di Fivizzano-Turlago è contiguo verso nord-est al graben di Sermezzana. Il limite tra le due strutture è costituito da una faglia minore immergente a nord-est. Ancora più a sud un'altra faglia a direzione appenninica e immersione sud-ovest sembra costituire per 3-4 km l'ulteriore prolungamento del bordo sud-occidentale dell'horst di Fivizzano.

Per le faglie a direzione antiappenninica non viene quasi mai indicato il lato ribassato. Faglie a direzione NE-SW ed E-W sono presenti nella alta valle del torrente Rosaro tra Sassalbo e le pendici del M. Turano e vengono interpretate come *transfer-fault* con probabile movimento trascorrente destro (Bernini, 1991). Anche il basso corso del torrente Rosaro, tra Fivizzano e la confluenza con il torrente Aulella, sarebbe in corrispondenza di una faglia trascorrente a direzione antiappenninica (Raggi, 1985). Tutto il li-

neamento lungo la valle del torrente Rosaro apparterebbe alla più vasta linea trasversale Sarzana-Val Secchia, definita in senso più ampio come banda di discontinuità o deformazione (Boccaletti & Coli, 1985). Avrebbe sempre un significato di *transfer-fault* anche la faglia a direzione antiappenninica coincidente con il fondovalle dell'alto Aulella tra Casola in Lunigiana e Regnano (Moretti, 1989). La faglia a direzione antiappenninica che delimita il bordo nord-occidentale del massiccio apuano tra la valle di Tenerano ed Equi Terme avrebbe un rigetto prevalentemente verticale pur ammettendo limitati spostamenti orizzontali (Carmignani & alii, 1992). Anche il sistema di faglie a direzione WNW-SSE comprese tra Equi Terme e lo spartiacque con la Garfagnana, a sud di Minucciano sono classificabili come faglie dirette a immersione nord. In particolare quelle che mettono a contatto la Falda Toscana con l'«Autoctono Apuano» mostrano angoli bassi e componenti rotazionali (Carmignani & Kligfield, 1990).

Alta Garfagnana

In alta Garfagnana si rileva una minore complessità rispetto alla Lunigiana nella geometria del graben, ma non mancano elementi minori di incerta interpretazione, soprattutto in corrispondenza dell'asse della depressione.

Il bordo nord-occidentale del graben del Serchio, tra il M. Tontorone e la valle di Gramolazzo, è marcato dai contatti tettonici tra «Autoctono Apuano» e Falda Toscana, che costituiscono un sistema di faglie listriche normali a basso angolo, orientate WNW-ESE e NW-SE, immergenti a nord e tendenti all'orizzontale a livello delle evaporiti triassiche (Carmignani & Kligfield, 1990). La faglia normale di Gorfigliano si trova più a oriente di questo sistema e con una lunghezza di 5 km e un rigetto di 300 m costituisce il più importante lineamento tra la depressione tettonica e il massiccio apuano (Antiga & *alii*, Nardi & *alii*, 1991). Sembra molto probabile la prosecuzione di questa faglia con la faglia di Minucciano, in Lunigiana, anche se questa sembra dislocata rispetto alla precedente, dall'ipotetica e indefinita faglia a orientazione E-W, coincidente con l'asse della valle di Gramolazzo (Carmignani, 1985).

Spostandosi ad est verso l'asse della depressione, secondo alcuni Autori, si può individuare a nord di Gramolazzo, un'altra faglia normale ad alto angolo, con direzione appenninica e immersione a nord-est, che separa due affioramenti dei Ciottolami di M. Lupacino. Questa faglia delimiterebbe ad ovest la parte più ribassata del graben di Sermezzana, il quale si estende verso est fino ad un fascio di faglie normali di direzione NNW-SSE e immersione ovest, allineate tra Varliano, Capoli e Cortia nel bacino idrografico del torrente Gragnana.

L'area quadrangolare ad ovest dell'asse del graben, compresa all'interno di una decina di chilometri quadrati e avente per angoli le località di Varliano, Castagnola, Piazza al Serchio e S. Anastasio, è caratterizzata da una particolare complessità geologico-strutturale a causa della difficile distinzione tra i limiti di eventuali blocchi fagliati e semplici contatti tettonici per sovrascorrimento tra affioramenti di Macigno e formazioni liguri. La prima interpretazione, formulata negli anni '60, descrive un'area complessivamente di alto strutturale caratterizzata da piccoli horst e graben, limitata ad ovest dalla faglia di Capoli e ad est dalla faglia sub verticale di M. Fabiano (Bartolini & Bortolotti, 1971). Quest'ultima ha una direzione circa N-S ed è quasi coincidente con il tratto inferiore del torrente Gragnana. Faglie trasversali antiappenniniche limiterebbero quest'area quadrangolare sia a sud che a nord. L'interpretazione nata dai rilevamenti effettuati alla fine degli anni '80 riduce notevolmente le faglie rispetto alla precedente, mantenendo solo l'horst di Macigno e i suoi limiti nella parte settentrionale ed introducendo a nord-est di Gragnana una faglia subverticale, a direzione ENE-SSW e immersione nord, la quale abbasserebbe gli affioramenti dell'unità di Ottone-S. Stefano rispetto ai Calcari del Groppo del Vescovo (Nardi & *alii*, 1991).

Il bordo nord-orientale del graben del Serchio è delimitato a partire dall'asse della depressione da un sistema di faglie normali discontinue, immergenti a ovest, con rigetti di 150-250 m e comprese tra Dalli e S. Romano (Moretti, 1992). Il tratto più settentrionale del sistema, quasi parallelo al Serchio di Sillano, è rappresentato dalla faglia Sillano-Capriagnana, orientata NNW-SSE, che risulta dislocata di 200 m verso ovest, nei pressi di Livignano, per la presenza

di due elementi minori trasversali (Castaldini & *alii*, 1996). Verso nord-est nel bacino del Serchio di Soraggio, alcune faglie appenniniche lunghe 2-3 km delimitano, nel sistema complessivo di faglie dirette a gradinata, la piccola finestra tettonica di calcari mesozoici di Villa e il contiguo piccolo graben di Macigno tra il M. Mescosa e Metello (Baldacci & Plesi, 1987). Il bordo settentrionale del graben del Serchio è delimitato da due faglie normali appenniniche a immersione sud-ovest e da alcune faglie antiappenniniche la cui ubicazione e lunghezza non trovano congruenza tra i vari Autori. La più orientale delle faglie appenniniche è la faglia di Pontecchio che aumenta il suo rigetto spostandosi verso sud e ribassa l'unità di Canetolo rispetto al Macigno. L'altra faglia appenninica è la faglia di Magliano che costituisce una probabile prosecuzione della faglia del M. Grosso che è una delle faglie a gradinata del bordo orientale del graben lunigianese.

Il fascio di faglie trasversali a direzione antiappenninica e a prevalente componente diretta con immersione sud-est viene situato da alcuni autori tra Dalli e Giuncugnano, sia in corrispondenza dei contatti tettonici tra Macigno e unità di Canetolo e sia nella dislocazione di formazioni dell'unità di Canetolo come nel caso della faglia del M. Grula nei pressi di Magliano (Nardi & *alii*, 1989).

ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA

La geomorfologia quantitativa applicata allo studio dei bacini idrografici descrive oggi le caratteristiche morfometriche e le proprietà lineari, areali e morfologiche del bacino stesso. Le proprietà lineari sono espresse da parametri che esprimono il numero e il livello di gerarchizzazione dei corsi d'acqua. I parametri espressi originariamente da Horton sono stati perfezionati da Strahler nel 1954 e successivamente ampliati negli anni '60 dalla sperimentazione di alcuni ricercatori italiani che li hanno applicati allo studio di diversi settori dell'Appennino Centrale con sviluppi significativi anche al settore della geomorfologia strutturale (Avena & *alii*, 1967; Ciccacci & *alii*, 1986; Bisci & *alii*, 1988; Ciccacci & *alii*, 1988; Lupia Palmieri & *alii*, 1995; Centamore & *alii*, 1996). La scelta dei parametri utilizzati nell'analisi geomorfica quantitativa eseguita in questo studio è stata quindi guidata dalle potenzialità che tali parametri hanno espresso nella descrizione e nell'interpretazione dei caratteri morfostrutturali del rilievo nel corso di ricerche recenti sul territorio italiano. Le proprietà areali hanno trovato un'applicazione fondamentale nel calcolo della densità di drenaggio (D). Questo parametro applicato allo studio di diverse regioni europee ed americane si è dimostrato direttamente proporzionale all'intensità delle precipitazioni, all'impermeabilità dei terreni affioranti, alla erodibilità dei terreni e alle caratteristiche di fratturazione dei litotipi. Un altro importante parametro di analisi areale è risultato quello dell'energia di rilievo (E_r) che si è dimostrata strettamente associata all'intensità dei processi erosivi gravitativi e fluviali (Ciccacci & *alii*, 1988; Lupia Palmieri & *alii*, 1995; Centamore & *alii*, 1996).

Carta dell'energia di rilievo

La carta dell'energia di rilievo è stata elaborata alla scala 1:50 000. Il dislivello massimo espresso in metri è stato espresso per aree unitarie di 1 km² con dati ricavati dalla Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10 000. La suddivisione in classi è stata basata su variazioni di 100 m, ad esclusione della classe più bassa con valori inferiori a 150 m e della classe più alta con valori superiori a 450 m (fig. 3).

I valori più bassi sono risultati limitati alle aree dei fondivalle alluvionali del T. Rosaro e Aulella situati a SW di Fivizzano e a W di Codiponte. Valori mediamente bassi (151-250) si riscontrano nelle maggiori valli dell'alta Garfagnana, in particolare nella parte medio-inferiore del bacino

del T. Gragnana e nella valle di Gramolazzo. In Lunigiana tali valori sono presenti solo nel tratto dell'alto T. Aulella compreso tra Montefiore e Casola e nel tratto vallivo in cui è situata Pieve S. Lorenzo.

La bassa energia di rilievo che a parità di quote è più marcata sul lato della Garfagnana è solo in parte spiegabile con gli affioramenti prevalenti di litotipi argilloso-marnosi o dei depositi fluviali villafranchiani: ad esempio le sommità dei rilievi costituite dal Flysch ad Elmintoidi di Ottono-S. Stefano, pur essendo questa formazione presente su entrambi i versanti, si caratterizzano sempre per la minore acclività sul lato garfagnino. Il settore dell'alta Garfagnana con la maggiore omogeneità di valori bassi si trova proprio

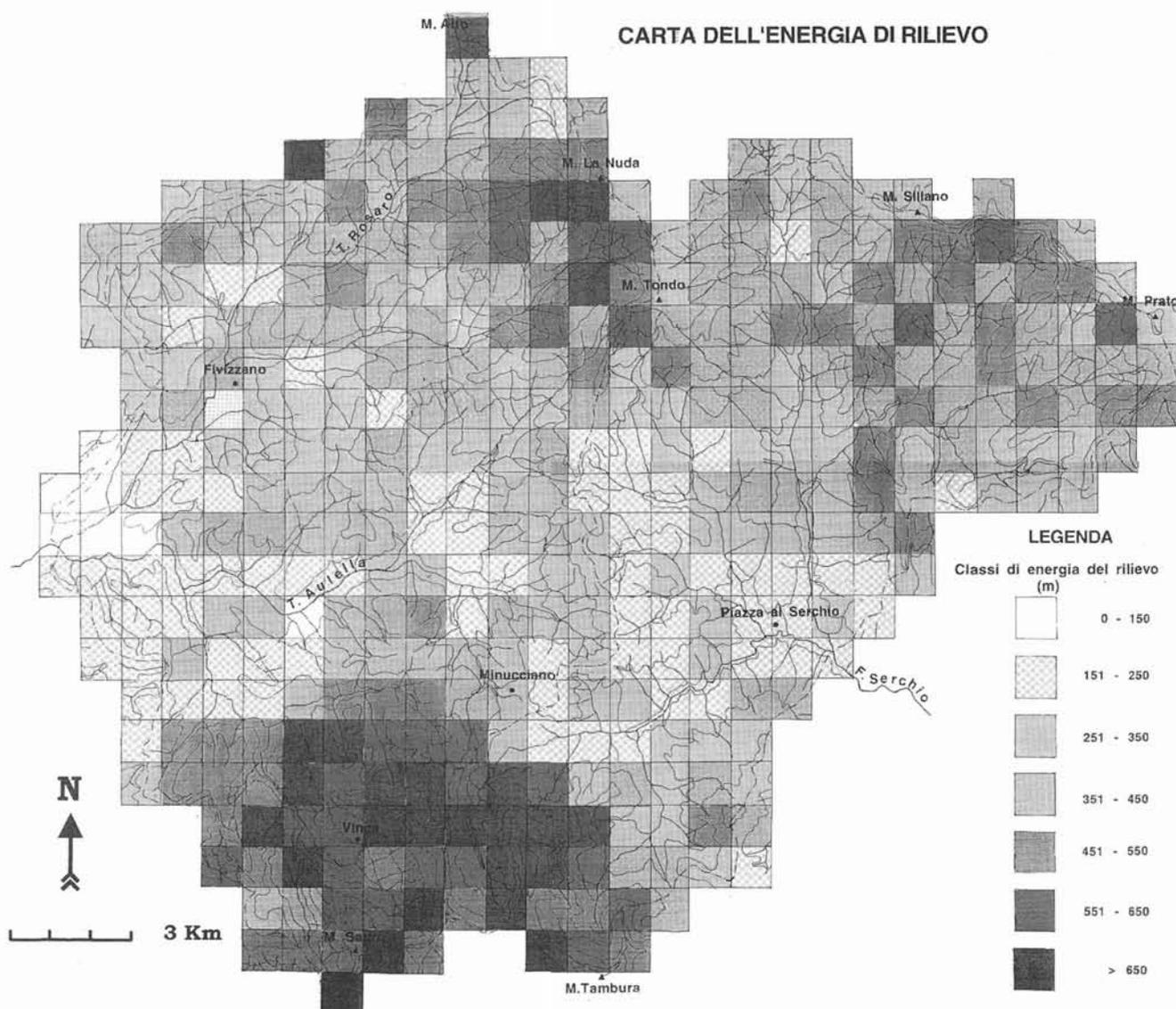


FIG. 3 - Carta dell'energia di rilievo.

FIG. 3 - Map of amplitude of relief.

in corrispondenza della zona tettonicamente più depressa del graben tra Nicciano e Giuncugnano. Aree isolate a bassa energia di rilievo si trovano sempre in Garfagnana nella zona di Capanne di Sillano, caratterizzata da depositi glaciali e da frane di colamento e in corrispondenza ai ripiani calcarei di Casini di Corte e del M. Roggio. In Lunigiana le aree isolate a bassa energia di rilievo sono nei pressi del Passo del Cerreto per l'affioramento di rocce più tenere e tra Collegnago e Vedriano sul crinale tra la valle del T. Aulella e quella del T. Mommio.

I valori di energia di rilievo superiori a 650 m sono concentrati intorno alle maggiori vette apuane (M. Sagro, M. Pisanino, Pizzo d'Uccello), a ridosso del crinale appenninico presso il M. La Nuda e nell'alta valle del T. Mommio. In generale tutto il massiccio apuano ha valori superiori a 550, ad esclusione della zona del M. Borla, caratterizzata da un ripiano calcareo. Tale caratteristica è uniforme indipendentemente dalla grande variabilità litologica e fa ipotizzare che tutto il massiccio apuano sia ancora fortemente interessato da un sollevamento marcato e che questo sia più rapido rispetto alle aree circostanti. Valori medio alti e superiori a 550 caratterizzano anche l'area del crinale appenninico sul lato lunigianese, e sebbene gli affioramenti di Macigno da cui è costituito presentino le stesse caratteristiche litostrutturali del crinale appenninico dell'alta Garfagnana, in quest'ultimo osserviamo valori inferiori. Questo dato potrebbe indicare un sollevamento più pronunciato sull'horst orientale della Lunigiana rispetto a quello corrispondente della Garfagnana.

Una situazione a «macchia di leopardo» si evidenzia nel bacino del Serchio di Soraggio, dove, a parte i valori intorno a 500 in corrispondenza del crinale tra il M. Sillano e il M. Prato, si nota una variazione a blocchi del parametro tra 350 e 450, associabile agli affioramenti dominanti di rocce arenacee (Macigno) e argillose (Scaglia Toscana), separati nettamente da faglie a direzione appenninica e antiappenninica. Valori anomali relativamente più elevati rispetto alle zone circostanti si evidenziano sul versante meridionale della valle del T. Fiatano, in un tratto della valle del Serchio di Sillano a E di Dalli di Sotto e in corrispondenza del M. Tontorone nella valle di Gorfigliano.

L'interpretazione dei dati in pratica evidenzia alcune caratteristiche che non possono essere solo riconducibili a motivi litostrutturali e delinea una divisione dell'area in tre settori (Duomo apuano, Horst appenninico e zona centrale) con valori decrescenti del parametro.

Carta del reticolo idrografico

L'analisi e lo studio approfondito del drenaggio superficiale finalizzato a scoprire eventuali rapporti con le caratteristiche morfostrutturali ha richiesto un insieme di dati che la semplice lettura delle informazioni idrografiche dalle Carte Tecniche Regionali non forniva. Nell'elaborazione della Carta del Reticolo Idrografico redatta in scala 1:10 000 e poi ridotta alla scala 1:50 000 sono riportate infatti tutte le possibili vie di drenaggio superficiale, compresi i corsi d'acqua a regime temporaneo e le vallecicole a fondo concavo e piatto, quiescenti o inattive e comunque indi-

cative dell'azione genetica dell'erosione lineare operata dalle acque superficiali. In pratica per la sua elaborazione è stata effettuata una fotointerpretazione di circa 400 km², associata al confronto sia con la C.T.R. alla scala 1:10 000 e sia con le carte topografiche alla scala 1:25 000 dell'I.G.M. Data la grande estensione, oltre alla divisione tra i bacini dell'alto Serchio e dell'alto Aulella, per classificare nel modo più accurato le caratteristiche della rete idrografica è stata compiuta una suddivisione in bacini principali contraddistinti numericamente e questi a loro volta sono stati suddivisi in sottobacini minori associati a lettere minuscole. I tipi di *pattern* idrografici osservabili rientrano nei tipi subdendritico, convergente, pinnato e angolato.

Nel bacino del Serchio di Soraggio soprattutto nelle parti superiori dei sottobacini si evidenzia un *pattern* convergente e in parte angolato, legato probabilmente all'alta acclività e al sistema di faglie e di fratture presenti. Il bacino del Serchio di Sillano è allungato N-S e si presenta angolato nel tratto mediano e inferiore e convergente in quello superiore. L'influenza tettonica appare più marcata sul sistema di aste che confluiscono obliquamente nel collettore principale sul versante occidentale a nord di Sillano. Anche il bacino del T. Gragnana presenta nella parte medio-inferiore un *pattern* angolato secondo direzioni WSW-ESE e NNW-SSE, mentre nella parte superiore sono presenti anche le direzioni NW-SE e NE-SW. Sugli affioramenti di conglomerati villafranchiani prevale un *pattern* pinnato che sembra legato alla minore energia di rilievo e all'omogeneità litologica. Il bacino del torrente Acqua Bianca ha un *pattern* angolato e subdendritico nell'area del massiccio apuano e più marcatamente subdendritico nella zona di affioramento delle rocce ofiolitiche. L'altro bacino apuano, appartenente al T. Lucido, ha un *pattern* più angolato rispetto al T. Acqua Bianca, soprattutto sui segmenti di maggiore lunghezza, mentre nella sua parte inferiore, a NW di Monzone, prevale la tipologia subdendritica.

Il bacino lunigianese del T. Tassonaro, affluente di sinistra del T. Aulella presenta un *pattern* complesso essenzialmente angolato nelle aree a più alta energia di rilievo e subdendritico in quelle in cui prevalgono gli affioramenti dei litotipi argilloso-marnosi e dei depositi fluviali villafranchiani. Le parti superiori dei bacini dei torrenti Aulella, Rosaro e Mommio sono prevalentemente caratterizzate da *pattern* angolato e in alcuni casi convergente, come alla testata della valle del T. Mommio. Il *pattern* delle porzioni inferiori è di tipo subdendritico e in alcune aree di affioramento di litotipi argillosi, con bassa acclività, troviamo anche *pattern* pinnati.

Carta della densità di drenaggio

Il valore di D (densità di drenaggio) è stato calcolato in aree unitarie di 1 km² ed è stato espresso come sommatoria della lunghezza in chilometri di segmenti idrografici all'interno di ogni chilometro quadrato. L'elaborazione è avvenuta prima con la divisione del reticolo idrografico in maglie chilometriche, in seguito ogni singolo chilometro quadrato è stato posto di fronte ad una telecamera collegata ad un software specializzato nella lettura ottica e nel calcolo

cumulativo della lunghezza delle linee. Il sistema viene usato generalmente per misure paleontologiche ma calibrato correttamente è risultato molto efficace per il calcolo rapido di D su ogni km^2 (fig. 4).

I valori più bassi si registrano esclusivamente sugli affioramenti di rocce calcaree massicce della Carcarai, del Catino, della Cresta Garnerone e del M. Borla sulle Alpi Apuane e dell'area dell'Orecchiella-Pania di Corfino sull'Appennino. Valori molto bassi, inferiori a 1,5 caratterizzano anche i depositi alluvionali estesi tra Fivizzano e Soliera. I valori più elevati tra 7 e 8 sono tipici delle rocce ofiolitiche e dei conglomerati villafranchiani e di alcune aree ben localizzate di affioramento del Macigno e del Fly-

sch ad Elmintoidi. Per le rocce ofiolitiche il dato è abbastanza prevedibile data l'intensa fratturazione che mostrano sul terreno, mentre per i conglomerati, vista la loro buona permeabilità, l'energia di rilievo medio-bassa e la totale copertura boscosa, l'alta densità di drenaggio non può che essere attribuita ad un alto livello di tettonizzazione.

Le zone di affioramento del Macigno con alta densità di drenaggio sono parzialmente in rapporto all'energia di rilievo e localmente legate al grado di fratturazione. Un comportamento di questo tipo è concentrato nelle alte valli dei torrenti Aulella e Mommio e nell'area tra Casola e Codiponte, lungo un tratto intermedio della valle del T. Aulella. Valori superiori a 3,5 sono presenti sugli affiora-

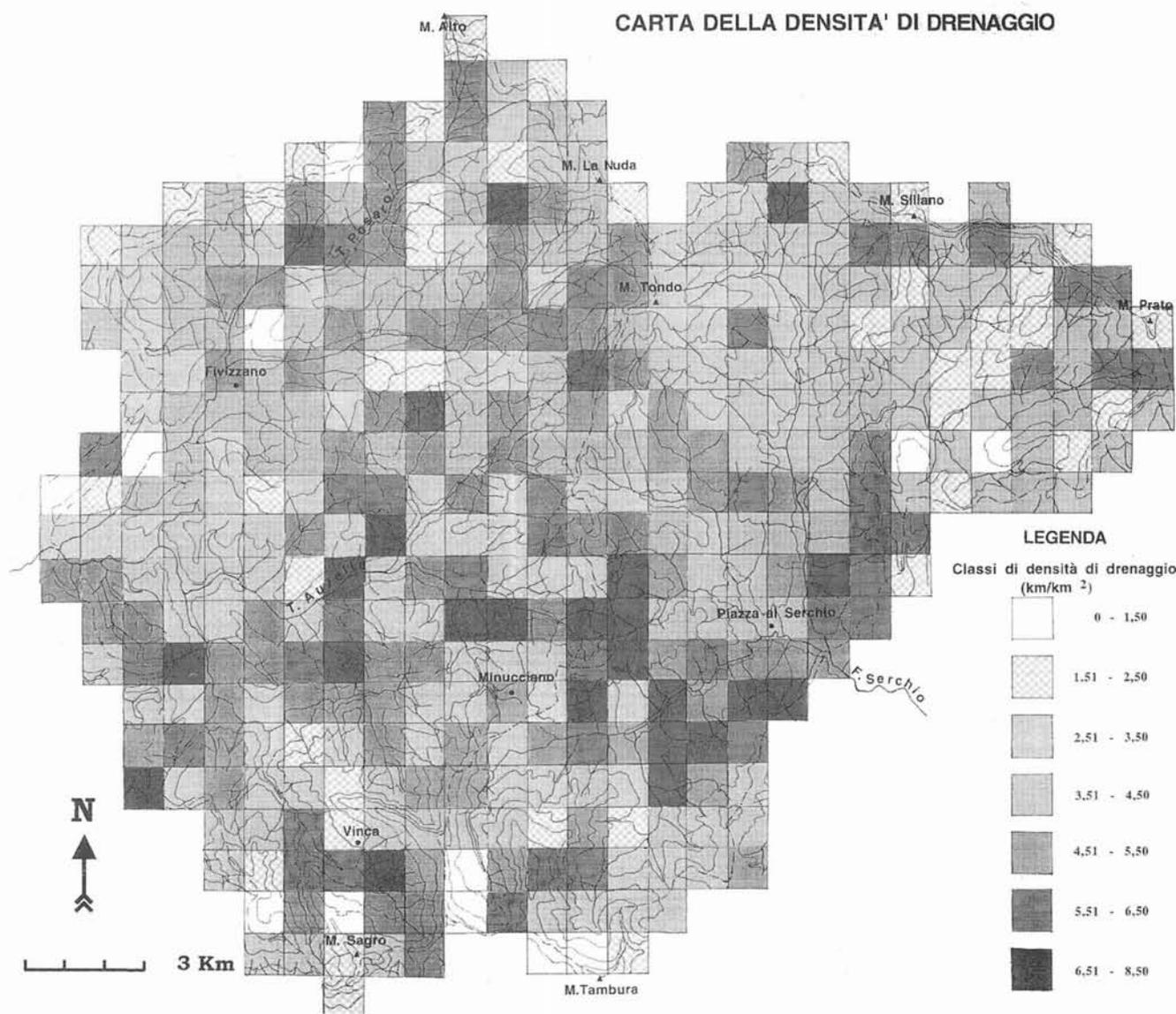


FIG. 4 - Carta della densità di drenaggio.

FIG. 4 - Map of drainage density.

menti delle rocce calcareo marnose delle unità liguri che si estendono nelle valli lunigianesi che registrano una densità di drenaggio superiore agli stessi litotipi in Garfagnana.

Valori inferiori a 3,5 sono invece comuni sugli affioramenti di Macigno nell'alta Garfagnana anche in aree con alta energia di rilievo come in prossimità del crinale appenninico ad eccezione però dell'alta valle del Fiume di Corte, della zona di Dalli e del versante sud-occidentale del M. Sillano. Una buona uniformità su valori medio bassi della densità di drenaggio è evidente su tutto il complesso apuano e nel bacino del Serchio di Soraggio, probabilmente in rapporto a una maggiore permeabilità di questi settori legata alla maggiore presenza di rocce calcaree.

Analisi dei parametri morfometrici

Per analizzare meglio la disposizione geometrica e l'organizzazione dei reticoli idrografici si è proceduto alla gerarchizzazione dell'intero reticolo, utilizzando il sistema di classificazione proposto da Strahler e ad ogni bacino è stato assegnato l'ordine relativo al segmento fluviale di grado più elevato compreso in esso.

Lo studio delle caratteristiche di gerarchizzazione dei reticoli idrografici si è dimostrato utile nel fornire importanti contributi sulla comprensione delle tendenze evolutive dei processi erosivi (Ciccacci & alii, 1980; Ciccacci & alii, 1988; Lupia Palmieri & alii, 1995; Centamore & alii, 1996). L'utilizzo di parametri morfometrici consente anche attraverso relazioni basate su modelli matematici e statistici, di analizzare e interpretare in termini quantitativi le modalità dei processi fluviali. A partire da Horton (1945) lo sviluppo dell'analisi geomorfica quantitativa nella sua applicazione allo studio dell'evoluzione dei bacini fluviali ha portato al miglioramento delle tecniche di classificazione e alla riduzione della soggettività. Le modalità per ricavare informazioni sul tipo di stato gerarchico dei bacini sono state elaborate negli ultimi anni da alcuni ricercatori italiani che hanno applicato nuovi parametri che si basano sull'influenza dei segmenti anomali nell'organizzazione gerarchica dei reticoli (Avena & alii, 1967). Sono in pratica quei segmenti idrografici che non si immettono direttamente nel collettore di ordine immediatamente superiore. La presenza e la distribuzione dei segmenti anomali riduce la condizione di perfetta gerarchizzazione del reticolo, intesa come condizione ideale in cui tutti i segmenti fluviali presenti si riversano in segmenti dell'ordine immediatamente successivo.

I calcoli dei parametri sono stati effettuati in ogni sottobacino e nei bacini principali e data la diversità nell'estensione dei singoli bacini e la variabilità riscontrata nella densità di drenaggio si è proceduto, nella parte preliminare dell'analisi morfometrica, alla determinazione dell'area e della densità di drenaggio di ogni singolo bacino. I parametri calcolati sono il rapporto di biforcazione (R_b), il rapporto di biforcazione diretto (R_{bd}), l'indice di biforcazione (R), il numero di anomalia gerarchica (G_a), la densità di anomalia gerarchica (g_a) e l'indice di anomalia gerarchica Δa . Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati i dati sui parametri morfometrici rispettivamente dei bacini principali e secondari.

L'esame dettagliato dei valori dei parametri dei bacini principali mette in risalto una situazione disorganizzata dell'intero reticolo con valori medio-alti degli indici, espressiva di un quadro che risulta a prima vista in generale disequilibrio. I valori più alti appartengono al bacino del T. Aulella, del T. Lucido e del T. Gragnana.

I valori più elevati del rapporto di biforcazione (5,14), del rapporto di biforcazione diretto (3,61) e dell'indice di anomalia gerarchica (1,74) si trovano nel bacino del T. Lucido; il valore più elevato dell'indice di biforcazione (1,62) nel bacino del T. Gragnana e il valore più elevato della densità di anomalia gerarchica (28,22) nel bacino del T. Aulella. I valori più bassi degli indici appartengono ai bacini del Serchio di Sillano e del T. Rosaro.

Il confronto dei parametri tra i bacini lunigianesi del T. Aulella e del T. Lucido con quelli dell'alta Garfagnana mette in risalto nei primi non solo un minor grado di gerarchizzazione ma anche una maggiore presenza di anomalie dei segmenti del primo ordine. Analizzando i dati dei bacini secondari un forte disequilibrio si evidenzia nei bacini garfagnini del F. Grosso e C. Grosso, appartenenti all'alto bacino del T. Gragnana e situati sul versante meridionale del crinale appenninico principale. Nel bacino del F. Grosso, malgrado il valore intermedio della densità di drenaggio (3,88 km/km²), la densità di anomalia gerarchica raggiunge il valore elevato di 24,75. Negli altri sottobacini meridionali del bacino del T. Gragnana si rilevano valori elevati della densità di anomalia gerarchica (11,43-18,82) che contrastano con i valori modesti dei rapporti e dell'indice di biforcazione e i valori medi dell'indice di anomalia gerarchica (0,58-0,83). La presenza di rocce marnose argillose e della maggiore estensione dei depositi conglomeratici e l'alta densità di drenaggio relativa (5,13-5,82) probabilmente non spiegano completamente la presenza così alta di

TABELLA 1 - Parametri morfometrici dei bacini principali
TABLE 1 - Morphometric parameters of main basins

n°	Bacino	Ordine	A kmq	D km/kmq	R _b	R _{bd}	R	G _a	g _a	Δ a
1	T. ACQUA BIANCA	VI	37,72	4,57	3,97	2,97	1,00	820	21,75	1,12
2	T. AULELLA	VII	83,50	4,75	4,29	3,18	1,11	2356	28,22	1,72
3	T. ROSARO	VI	78,06	3,76	3,65	2,48	1,17	1231	15,77	0,11
4	T. LUCIDO	VI	45,32	4,15	5,14	3,61	1,53	979	21,60	1,74
5	T. SERCHIO DI SILLANO	VI	76,68	3,74	3,94	2,94	1,00	1006	13,12	1,58
6	T. GRAGNANA	V	16,82	4,24	4,81	3,18	1,62	303	18,01	1,47

TABELLA 2 - Parametri morfometrici dei bacini secondari

TABLE 2 - Morphometric parameters of minor basins

sigla	Bacino	Ordine	A kmq	D km/kmq	Rb	Rbd	R	Ga	ga	Δa
1a	SERCHIO DI GRAMOLAZZO	V	16,98	3,93	3,87	2,91	0,96	129	7,62	0,73
1aa	ALTO S. DI GRAMOLAZZO	IV	12,42	3,85	4,08	3,05	1,03	65	5,23	0,75
1ab	C. GRANDE	IV	1,50	6,54	3,41	2,53	0,88	27	18,00	0,73
1b	F. COLLAPERA	IV	0,84	7,21	4,17	2,45	1,73	27	32,14	1,13
1c	F. ACQUA BIANCA	V	10,14	4,06	3,81	3,04	0,77	91	8,97	0,52
1ca	F. MONTAGNA	IV	1,82	5,90	3,33	3,04	0,29	6	3,33	0,23
1cb	F. VITELLINO	IV	2,04	4,44	3,60	2,49	1,12	19	9,31	0,66
1cc	F. GORFIGLIANO	IV	1,68	5,14	4,01	2,98	1,03	13	7,74	0,57
1d	F. CARPINELLA	IV	0,66	3,23	3,53	3,10	0,43	7	10,61	0,35
1c	F. MAROSCIA	IV	2,34	5,80	3,68	2,47	1,21	44	18,8	1,02
1f	F. AMPONETO	IV	0,96	6,67	4,12	2,94	1,18	26	27,08	0,84
2a	ALTO T. AULELLA	V	21,96	4,84	3,96	2,94	1,02	201	9,15	0,8
2b	F. SERRANA	IV	3,67	4,88	3,56	2,73	0,83	12	3,27	0,46
2c	C. DELLE SELVE	IV	6,61	4,9	3,68	2,87	0,81	47	7,11	0,67
2d	ALTO T. AULELLA s.s.	IV	6,92	4,3	4,19	3,45	0,74	59	8,53	0,61
2e	T. TASSONARO	V	20,76	4,91	4,24	3,38	0,86	193	9,3	0,79
2ea	F. FIATANO	IV	4,14	6,03	4	3,24	0,76	36	8,7	0,56
2eb	F. MALANDRONE	IV	4,38	4,2	4,46	3,41	1,05	26	5,94	0,76
2ec	T. RONDONAIA	IV	8,07	4,8	4,46	3,73	0,73	29	3,59	0,33
3a	ALTO T. ROSARO	V	34,8	3,47	4,44	2,85	1,59	440	12,64	1,59
3aa	ALTO T. ROSARO s.s.	V	14,16	3,43	4,15	2,36	1,79	104	7,34	1,11
3b	T. MOMMIO	V	29,16	4,2	2,98	2,26	0,71	255	8,74	1,47
3ba	ALTO T. MOMMIO	V	9,12	4,29	3,82	3,1	0,72	51	5,59	0,57
4a	ALTO T. LUCIDO	V	20,72	4,25	4,12	3,14	0,99	195	9,41	0,88
4aa	ALTO T. LUCIDO s.s.	IV	9,24	4,74	3,93	2,97	0,96	78	8,44	0,75
4b	T. LUCIDO DI UGLIANO	V	12,78	4,63	4,5	3,55	0,96	156	12,21	0,93
4ba	T. UGLIANO	IV	2,82	4,76	4,16	3,12	1,05	22	7,82	0,58
4bc	SOLCO DI EQUI	IV	4,86	4,61	3,91	3,27	0,64	35	7,2	0,5
5a	ALTO S. DI SILLANO	V	15,72	3,77	3,43	2,8	0,63	54	3,34	0,5
5b	SERCHIO DI SORAGGIO	IV	37,62	3,2	3,43	1,99	1,44	494	13,13	1,88
5ba	FIUME A CORTE	V	18,96	3,35	3,83	3,24	0,59	66	3,48	0,52
5bb	ALTO S. DI SORAGGIO	V	37,62	3,33	4	3,11	0,89	73	1,94	0,89
6a	F. GROSSO	IV	4,08	3,88	6,57	3,37	3,2	101	24,75	1,53
6b	C. GROSSO	IV	9,92	4,5	4,96	3,6	1,36	38	7,72	0,75
6c	FIUMICELLO	V	8,52	5,13	3,87	2,98	0,89	139	16,31	0,83
6ca	F. CAPOLI	IV	4,81	5,13	3,79	2,88	0,91	55	11,43	0,73
6cb	F. FORNACI	V	2,34	5,82	3,84	3,1	0,75	44	18,82	0,58

anomalie gerarchiche dei diversi ordini. Caratteristiche analoghe si riscontrano nei piccoli bacini del C. Grande, del F. Collapera e del F. Carpinella che drenano gli stessi litotipi sul fianco settentrionale della valle del T. Acqua Bianca. Nei bacini del F. Maroscia e F. Amponeto prevalentemente impostati sulle rocce ofiolitiche sono rilevanti i valori dell'indice di biforcazione (1,18-1,21) e del numero di anomalia gerarchica (18,8-27,8), ma si deve notare come qui si concentrano i valori più alti della densità di drenaggio (5,8-6,7).

Valori più alti degli indici sono evidenti anche per il bacino del T. Lucido di Ugliano, situato proprio al bordo settentrionale del massiccio apuano, per l'alto bacino del T. Rosaro, per il bacino del T. Mommio e per il bacino del Serchio di Soraggio. Malgrado nei dati complessivi il bacino del T. Rosaro mostri i valori più bassi degli indici, nei tratti medi dei corsi dello stesso T. Rosaro e del T. Mommio aumenta la presenza di anomalie gerarchiche, soprattutto nel primo di questi.

Separando i singoli dati dei due sottobacini principali del Serchio di Soraggio si nota come in realtà gli indici siano relativamente bassi e si deduce che i valori elevati dell'intero bacino sono da attribuirsi alla forte presenza di anomalie gerarchiche del primo e secondo ordine concentrate nel tratto rettilineo inferiore del corso d'acqua compreso tra Sillano e Villa Soraggio e orientato NE-SW.

Sui bacini apuani troviamo valori medio-alti dei parametri con valori leggermente più elevati nell'alto Serchio di Gramolazzo e nell'alto T. Lucido rispetto al bacino del F. Acqua Bianca. Nella scomposizione dei dati dei bacini secondari dell'alto T. Aulella emergono valori più alti nel bacino del T. Tassonaro e dei suoi sottobacini, soprattutto nei rapporti di biforcazione (4,00-4,46) e nei rapporti di biforcazione diretti (3,41-3,73).

Analisi azimutale delle aste fluviali

Lo studio dei rapporti diretti tra l'impostazione della rete idrografica e le linee preferenziali determinate dall'as-

setto strutturale dell'area hanno richiesto l'uso di metodi grafici statistici che attraverso l'informatizzazione e l'elaborazione dei dati geometrici hanno permesso una rappresentazione immediata delle direzioni preferenziali di scorrimento. La metodologia utilizzata è stata impiegata negli ultimi anni in diverse zone dell'Appennino Centrale dal gruppo di ricerca in geomorfologia dell'Università La Sapienza di Roma (Ciccacci & alii., 1986; Ciccacci & alii, 1988; Ciccacci & alii, 1992; Caputo & alii, 1995; Buonassorte & alii, 1991; Lupia Palmieri & alii, 1995; Centamore & alii, 1996). In Italia sono stati applicati altri metodi di analisi computerizzata delle orientazioni dei segmenti nel reticolo idrografico (Bisci & alii, 1988) che tuttavia avevano il limite di esaminare l'area dividendola in maglie retangolari, senza consentire una memorizzazione puntuale dei dati mediante una coppia di coordinate geografiche.

La prima fase del processo ha richiesto la digitalizzazione semiautomatica del reticolo idrografico a partire dalla carta del reticolo idrografico realizzata in scala 1:25 000 e suddivisa in quattro settori con i vertici orientati al millesimo con le coordinate geografiche. Successivamente si è utilizzata una penna elettronica per il tracciamento dei segmenti idrografici, rettificandolo per tratti di alcune decine di metri. Un software Autocad ha elaborato i dati in forma vettoriale. Dato che l'orientamento dei tratti fluviali ad andamento sinuoso nei fondovalle alluvionali, sebbene molto ridotti nell'area di studio, risulta generalmente indipendente da influenze strutturali, si è proceduto in questi casi nella rettifica manuale del tracciato secondo le direzioni dei fianchi vallivi principali. Se l'azimuth di due segmenti rettilinei adiacenti differisce in meno di due gradi, questi vengono uniti dal software a formare un unico segmento più lungo. I segmenti più lunghi di 100 metri vengono memorizzati in una banca dati nella quale per ognuno di essi è associato un codice contenente l'identificazione del bacino di appartenenza, le coordinate geografiche, la lunghezza e l'azimuth.

I dati finali sono stati rappresentati sulla base della lunghezza cumulativa. Si è optato per questa scelta dato che si ritiene che sia la più significativa a rilevare l'influenza sul reticolo di direzioni strutturali significative. Le curve gaussiane rappresentate in un diagramma a rosa permettono in seguito di visualizzare immediatamente le orientazioni preferenziali.

La digitalizzazione è avvenuta memorizzando separatamente i vari ordini gerarchici per ogni singolo bacino principale e per qualche sotto bacino di maggiore interesse. La scelta di separare l'acquisizione di dati con la divisione in bacini idrografici è motivata dal criterio di poter confrontare i dati finali con le altre informazioni morfostrutturali e con gli altri dati dell'analisi geomorfica quantitativa. Questa divisione in bacini idrografici ha consentito comunque di analizzare i dati separandoli in modo preciso secondo i settori in cui è divisa la zona dalle grandi linee tettoniche dei graben e degli horst e delle strutture trasversali.

I dati illustrati sono stati divisi nei singoli ordini dei bacini idrografici dell'alto T. Aulella nel tratto superiore a Casola in Lunigiana, del T. Mommio, del T. Rosaro, del T. Lucido, del T. Acqua Bianca, del T. Serchio di Sillano, del

T. Serchio di Soraggio e del T. Gragnana. In fig. 5 è rappresentata l'ubicazione geografica dei diagrammi azimutali dei segmenti di primo ordine nei bacini minori. I dati provenienti da questi bacini sono stati sommati tra loro consentendo di evidenziare le orientazioni preferenziali sul massiccio delle Alpi Apuane (T. Lucido e T. Acqua Bianca), sul settore lunigianese orientale del graben dell'alta valle del Magra (T. Rosaro e Alto T. Aulella) e sul settore settentrionale del graben del Serchio (T. Serchio di Sillano, T. Serchio di Soraggio e T. Gragnana) (fig. 6).

Per confrontare i due grandi bacini idrografici dell'alto Aulella e dell'alto Serchio la cui linea spartiacque è quasi coincidente con la zona di separazione tra le due depressioni tettoniche, sono stati elaborati anche i loro diagrammi azimutali. Per evidenziare maggiormente le direzioni più significative negli ordini dei vari bacini i dati sono stati rappresentati anche su tabelle (tabelle 3 e 4) che riportano gli azimuth delle direzioni a maggiore altezza relativa e con minore deviazione standard nei bacini principali e secondari, in modo anche da visualizzare le variazioni azimutali delle orientazioni al cambiare dell'ordine gerarchico.

Il primo dato significativo che emerge dai diagrammi è la netta prevalenza nei bacini dell'alto T. Aulella, del T. Gragnana e nei bacini apuani della direzione E-W (88°-90° N). Soprattutto sulle Alpi Apuane l'altezza relativa di questa direzione aumenta all'abbassarsi dell'ordine gerarchico, risultando ad esempio poco significativa nei segmenti del terzo e quarto ordine del bacino idrografico del T. Lucido e T. Acqua Bianca. L'importanza di tale direzione diminuisce progressivamente spostandosi verso nord sui bacini dei T. Mommio e Rosaro e verso NE nel bacino del Serchio di Sillano. Nel bacino del Serchio di Soraggio, sul bordo orientale della depressione della Garfagnana, la direzione E-W non la troviamo molto significativa neppure negli ordini inferiori. Al contrario nel bacino del torrente Gragnana la direzione E-W è netta anche nel quinto ordine, mentre nel bacino dell'alto T. Aulella è netta solo nei primi tre ordini.

Per cogliere altri aspetti rilevanti nella distribuzione azimutale delle aste fluviali occorre addentrarsi in modo più specifico nei diagrammi dei singoli bacini. Partendo da est, in Garfagnana, si può constatare come le direzioni dominanti negli ordini inferiori del bacino del Serchio di Soraggio sono WNW-ESE (121°-128° N) e N-S (10°-18° N), mentre negli ordini superiori è presente la prevalenza di direzioni ENE-WSW (73°-68° N) e NE-SW (37°-50° N) e tali direzioni ruotano in senso antiorario all'abbassarsi degli ordini gerarchici. Spostandosi verso ovest nel bacino del Serchio di Sillano rimane negli ordini inferiori una direzione dominante WNW-ESE, ma con azimuth leggermente minore (111°-112° N) rispetto alla zona di Soraggio e la presenza più significativa di direzioni ENE-WSW (57°-70° N). Nel quarto ordine dell'intero bacino del Serchio di Sillano-Soraggio si osserva oltre a una maggiore dispersione dei dati, una prevalenza delle classiche direzioni appenninica e antiappenninica. Nel bacino idrografico del T. Gragnana emerge diversamente la dominanza della direzione NNW-SSE (167° N) negli ordini superiori e si nota verso gli ordini inferiori la progressiva attenuazione del-

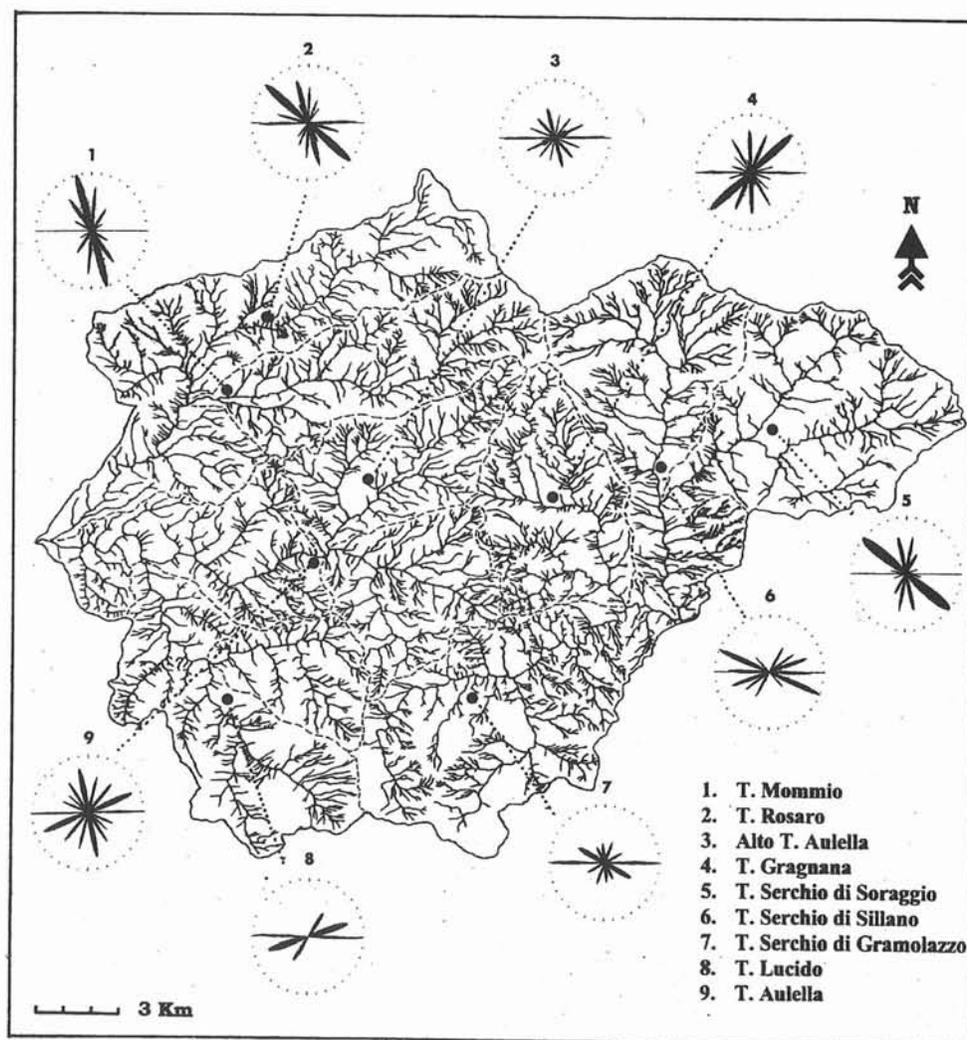


FIG. 5 - Carta della rete idrografica e delle orientazioni preferenziali dei segmenti fluviali di primo ordine nei bacini minori.

FIG. 5 - Map of drainage network and preferred stream orientations of first order in minor basins.

l'altezza relativa di questa direzione e la sua rotazione antioraria. Nel primo ordine oltre alla già citata direzione dominante E-W troviamo la direzione circa NW-SE, la direzione importante NE-SW, una direzione N-S (172° - 178° N) e in misura minore la direzione WNW-ESE (109° N). Sempre in Garfagnana, nel bacino del T. Acqua Bianca si evidenzia la rotazione antioraria di elementi idrografici dalla direzione NNW-ESE a NW-SE all'abbassarsi dell'ordine gerarchico, fino alla prevalenza nel primo ordine, oltre alla direzione E-W, di una direzione WNW-ESE (110 - 118° N). Verso gli ordini inferiori aumenta anche l'importanza della direzione circa NNE-SSW (20° N).

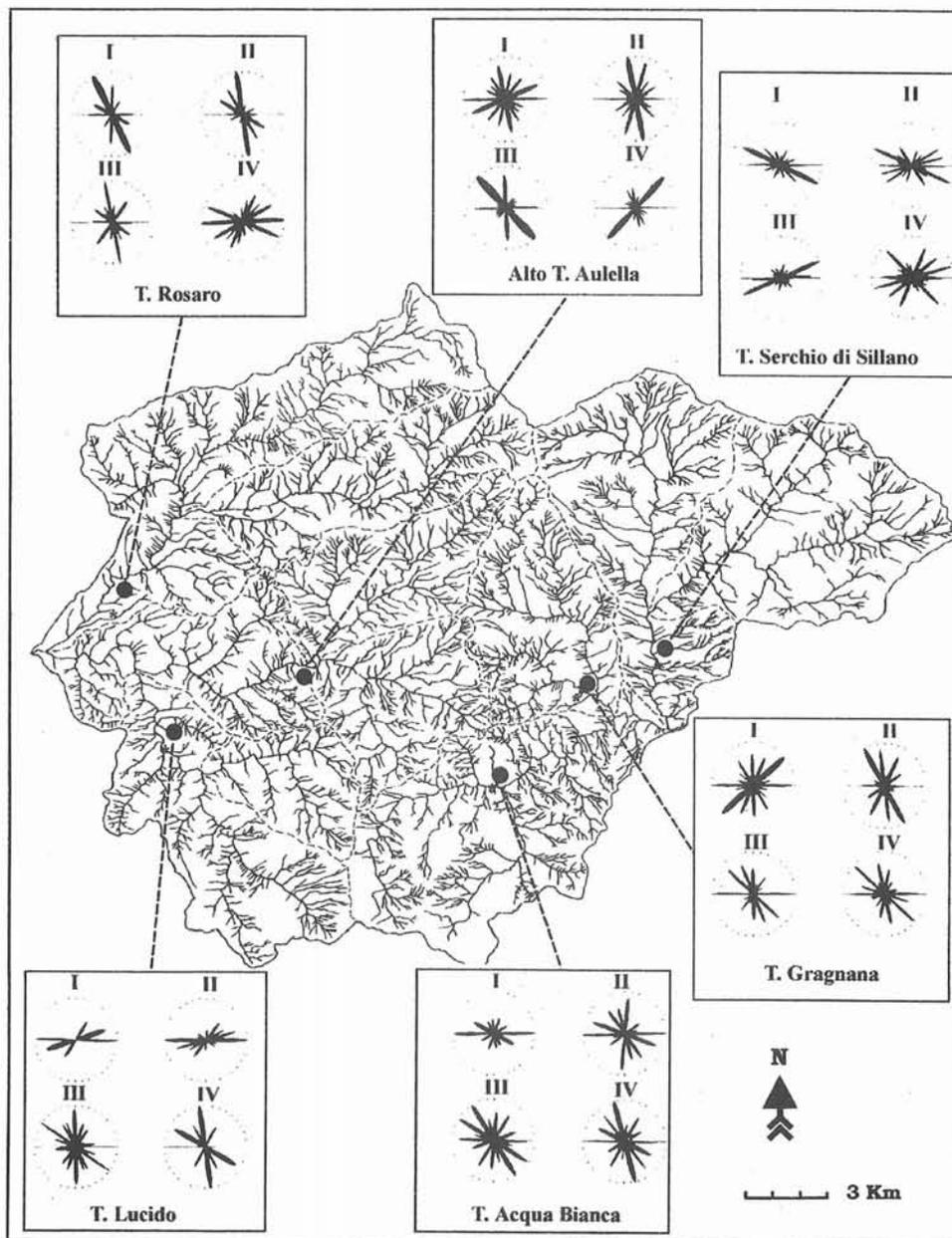
La rotazione antioraria delle direzioni maggiori appare molto chiara nei diagrammi azimutali calcolati per l'intero bacino dell'alto Serchio, dove si evidenziano le rotazioni sia della direzione NNW-SSE (da 165° a 148° N) sia di quella NW-SE (da 140° a 112° N) e sia della direzione ENE-WSW (da 72° a 60° N). Dal confronto tra i diagrammi azimutali dei bacini dell'alta Garfagnana si osserva inol-

tre nella direzione appenninica, a parità di ordine gerarchico, azimuth maggiori di alcuni gradi, spostandosi verso il bacino del T. Gragnana, nell'area di svincolo tra le due depressioni tettoniche.

In Lunigiana i diagrammi azimutali dell'alto bacino del T. Aulella indicano, oltre alla crescente altezza della direzione E-W all'abbassarsi dell'ordine gerarchico, la dominanza della direzione antiappenninica NE-SW (44° - 46° N) nel terzo e quarto ordine, la rotazione antioraria di pochi gradi delle direzioni NNW-SSE e NNE-SSW e il crescere dell'altezza relativa della direzione ENE-WSW (65° N) al diminuire dell'ordine. In particolare nel primo ordine si evidenziano tutte le cinque direzioni citate, anche se il minor valore della deviazione standard è espresso solo dalle aste orientate E-W, 110° N e 39° N. Tendenze e orientamenti simili si osservano nel bacino contiguo del T. Mommio anche se qui la direzione prevalente è circa NNW-SSE (164° - 177° N) con una leggera rotazione antioraria verso gli ordini inferiori. Dall'analisi dei dati del bacino del T. Rosaro che è posto ancora più a nord è ben marcata la rotazione

FIG. 6 - Carta della rete idrografica e delle orientazioni preferenziali dei segmenti fluviali nei bacini principali.

FIG. 6 - Map of drainage network and preferred stream orientation in main basins.



antioraria delle maggiori direzioni e come nel bacino del Serchio di Soraggio si ritrova la maggiore altezza relativa delle direzioni NW-SE e WSW-ESE. Il confronto tra i dati espressi dai diagrammi sui singoli bacini lunigianesi è sintetizzabile attraverso il raffronto tra i diagrammi dell'intero bacino del T. Rosaro (Rosaro-Mommio) e del bacino completo dell'alto Aulella (Aulella), che evidenzia, a parità di ordine gerarchico, nella direzione antiappenninica e nella direzione circa NNE-SSW (6° - 17° N) valori di alcuni gradi inferiori nei bacini più settentrionali. Se osserviamo i dati del bacino del T. Lucido, posto invece più a sud del bacino dell'alto T. Aulella, si individuano per le direzioni antiappenninica e per quella WNW-ESE, a parità di ordine, azi-

mut più simili a quelli dei bacini lunigianesi settentrionali. In contrasto a questa caratteristica troviamo però nei diagrammi degli ordini inferiori del T. Lucido la presenza di una direzione ENE-WSW (72° - 74° N) ad azimut più alto rispetto al bacino dell'alto T. Aulella e poco rappresentativa nel bacino contiguo ad est del T. Acqua Bianca.

L'analisi dei dati sul massiccio delle Alpi Apuane mostra con chiarezza la prevalenza di tre direzioni ravvicinate corrispondenti all'azimut E-W, 70° - 80° N, 107° - 118° N e limitatamente agli ordini superiori gli orientamenti NW-SE e WNW-SSE. Anche in questo settore si conferma la rotazione antioraria delle direzioni al diminuire dell'ordine gerarchico (tabella 5).

TABELLA 3 - Direzioni azimutali prevalenti delle aste fluviali nella Lunigiana orientale
 TABLE 3 - Prevalent azimuthal directions of the fluvial segments in eastern Lunigiana

BACINO			AZIMUTH																		
Sigla	Nome	Ordine	Dati (m)	0° 10°	11° 20°	21° 30°	31° 40°	41° 50°	51° 60°	61° 70°	71° 80°	81° 90°	91° 100°	101° 110°	111° 120°	121° 130°	131° 140°	141° 150°	151° 160°	161° 170°	171° 180°
A	AULELLA TOTALE	I	417760	4			35				70	90						148		165	
A	AULELLA TOTALE	II	201240				36				71	90				122					173
A	AULELLA TOTALE	III	9000				38				90	90				127		149			174
A	AULELLA TOTALE	IV	52100					45			89	90							152		171
2	AULELLA	I	148390							67	90				114						168
2	AULELLA	II	68430		17					70	90				118						169
2	AULELLA	III	37350								89	90					137				177
2	AULELLA	IV	21130					43													171
2a	ALTO AULELLA	I	95770		12		40			66	89		110				137				165
2a	ALTO AULELLA	II	45480	8			36			66	89					122					169
2a	ALTO AULELLA	III	21230	6				45			90						140				173
2a	ALTO AULELLA	IV	15910					46													
2a	ALTO AULELLA	V	6080			28		44													
3	ROSARO	I	146350	2							90			111					153		
3	ROSARO	II	69240								90			116				148			
3	ROSARO	III	27710										93								169
3	ROSARO	IV	13160			25		44	60		88			113							
3	ROSARO	V	16300							63	90										
3a	ALTO ROSARO	I	88080								89		105		130						164
3a	ALTO ROSARO	II	42980											120				147			171
3a	ALTO ROSARO	III	15170								89				126						168
3a	ALTO ROSARO	IV	7760		14					63	86										
3b	MOMMIO	I	58270	5							90							144			164
3b	MOMMIO	II	26260								90					121					175
3b	MOMMIO	III	12540					42													177
4	LUCIDO	I	12300				32				72	90									
4	LUCIDO	II	63570				37				74	89		108	120						
4	LUCIDO	III	24940													125					179
4	LUCIDO	IV	17810			28									119						171

Interpretazione strutturale

Mettendo a confronto i dati geomorfici con il quadro geologico-strutturale dell'area si evidenziano relazioni, conferme e indizi a favore di ipotesi interpretative sul regime tettonico regionale e locale. Il contributo delle informazioni quantitative può essere significativo nel campo strettamente litostrutturale qualificando il livello di fratturazione e di permeabilità dei litotipi e nel campo morfotettonico associando i lineamenti osservati alle caratteristiche tettoniche e sismotettoniche.

Nell'ambito morfostrutturale è evidente come i *pattern* angolati ed il parametro della densità di drenaggio risultino in stretto rapporto al grado di fratturazione dei litotipi. Le differenze di valori si manifestano anche sullo stesso litotipo come nel caso dei joint sugli affioramenti di Macigno, i quali condizionano maggiormente l'idrografia sul versante lunigianese a causa forse di una maggiore acclività media dei versanti. I dati quantitativi concordano nel rilevare sulla formazione dei Ciottolami di M. Lupacino un livello di tettonizzazione che confermerebbe le ipotesi sulla sua appartenenza al ciclo sedimentario del Pliocene superiore più che a quello del Pleistocene medio (Antiga, 1989).

Le valutazioni sui sollevamenti areali differenziali emerse dall'analisi dell'energia di rilievo, dalle caratteristiche dei *pattern* idrografici e dai valori dei parametri morfometrici evidenziano una maggiore velocità di innalzamento del complesso apuano rispetto all'area dello spartiacque principale appenninico, mentre l'intensità dei fenomeni distensivi appare più pronunciata nel graben dell'alta valle del Magra piuttosto che in quello dell'alta valle del Serchio.

In riferimento all'interpretazione tettonica dei dati si presenta la difficoltà di discernere il loro significato rispetto alle condizioni deformative che si prendono in considerazione. La loro espressione può essere associata al regime regionale che ha impostato i due graben, al regime locale determinato dalla zona di trasferimento tra le due depressioni oppure a regimi associati a significative linee trascorrenti. Seguendo l'evoluzione tettonica post-tortoniana si può facilmente associare le direzioni degli assi vallici più antichi e le aste fluviali di ordine più alto alla direzione NNW-SSE, come risulta evidente nei tratti mediani del T. Gragnana, del T. Lucido, del F. Acqua Bianca e dell'alto Serchio di Gramolazzo, e alla direzione quasi trasversale ENE-WSW tipica dei tratti medi dei torrenti Au-

TABELLA 4 - Direzioni azimutali prevalenti delle aste fluviali nella Garfagnana settentrionale
 TABLE 4 - Prevalent azimuthal directions of the fluvial segments in northern Garfagnana

BACINO			AZIMUTH																			
Sigla	Nome	Ordine	Dati (m)	0° 10°	11° 20°	21° 30°	31° 40°	41° 50°	51° 60°	61° 70°	71° 80°	81° 90°	91° 100°	101° 110°	111° 120°	121° 130°	131° 140°	141° 150°	151° 160°	161° 170°	171° 180°	
S	SERCHIO	I	354850			23			60			90			113							
S	SERCHIO	II	161810						56			90			112			148				
S	SERCHIO	III	85110							68		89				127			151			
S	SERCHIO	IV	50720								72	90					137				166	
S	SERCHIO	V	21140														140					164
1	ACQUA BIANCA	I	123220		20							90			118							
1	ACQUA BIANCA	II	57820	6								89		110								165
1	ACQUA BIANCA	III	34790										92			121			147			
1	ACQUA BIANCA	IV	23280									90			117			141				165
1	ACQUA BIANCA	V	5140	4																		161
5	S. SILLANO	I	155000											91		116		136				
5	S. SILLANO	II	73660									75	90		114							
5	S. SILLANO	III	35540		11					67		87										
5	S. SILLANO	IV	16710			23					74						137					
5	S. SILLANO	V	9730		11		32															166
5a	S. SILLANO s.s.	I	79490							70		91			112							
5a	S. SILLANO s.s.	II	42980						57		76				111							
5a	S. SILLANO s.s.	III	22840							64		85			115							
5b	S. SORAGGIO	I	75510	10												128						7.4
5b	S. SORAGGIO	II	30680		18											121		5.1				
5b	S. SORAGGIO	III	12790	0			37			68												
5b	S. SORAGGIO	IV	10510					50			73											
6	GRAGNANA	I	76630					48				90		105				148				
6	GRAGNANA	II	30330						55			90			113				151			
6	GRAGNANA	III	14780							62		90					134		159			
6	GRAGNANA	IV	10730									89					132					167
6	GRAGNANA	V	6270	7								90										168

TABELLA 5 - Direzioni azimutali prevalenti delle aste fluviali nelle Alpi Apuane settentrionali
 TABLE 5 - Prevalent azimuthal directions of the fluvial segments in northern Apuan Alps

BACINO			AZIMUTH																			
Sigla	Nome	Ordine	Dati (m)	0° 10°	11° 20°	21° 30°	31° 40°	41° 50°	51° 60°	61° 70°	71° 80°	81° 90°	91° 100°	101° 110°	111° 120°	121° 130°	131° 140°	141° 150°	151° 160°	161° 170°	171° 180°	
1+4	APUANE	I	246240							70		90										
1+4	APUANE	II	121390								74	89		107								
1+4	APUANE	III	59730								75	90		109						147		163
1+4	APUANE	IV	41090			28						90			118			141				168
1+4	APUANE	V	16140								80	92							160			176

lilla, Rosaro, Mommio e dei tratti inferiori del Serchio di Gramolazzo e del Serchio di Soraggio. Questi elementi risultano infatti sostanzialmente paralleli alle grandi direttrici tettoniche rappresentate dalle faglie che hanno impostato i due graben della Garfagnana e Lunigiana nel Pliocene inferiore-medio. Si può quindi ragionevolmente ricondurre il significato delle orientazioni di tali aste fluviali ad un asse distensivo regionale di direzione ENE-WSW associato alla fase tettonica del Pliocene medio (Argnani & alii, 1997).

Successivamente i dati azimutali dei segmenti fluviali indicano una rotazione antioraria delle direttrici strutturali principali sia appenninica che antiappenninica. Questa rotazione appare uniforme su tutti i bacini idrografici all'abbassarsi dell'ordine gerarchico e quindi sembra anch'essa associabile ad una variazione del regime tettonico regionale che porterebbe l'asse di massima estensione in direzione NNE-SSW. Tale cambiamento risulta successivo alla deposizione dei Ciottolami di M. Lupacino e si colloca probabilmente nel Pleistocene inferiore. Le rotazioni sono anche

interpretabili come l'effetto di elementi di trascorrenza sinistra ai quali viene attribuita un'importanza regionale da alcuni Autori (Fazzini & Gelmini, 1982; Sorgi & alii, 1998). Tuttavia la loro distribuzione omogenea anche nei bacini minori, quanto meno non consente di decifrare la posizione geografica di questi elementi strutturali, i quali tra l'altro non risultano particolarmente evidenziati nei rilievi geologico-strutturali pubblicati.

Nell'area corrispondente alla zona di raccordo tra i due graben, sul bordo settentrionale del *core complex* apuano si evidenziano maggiormente fenomeni locali di anomalia nella gerarchizzazione dei reticoli ed emerge la netta prevalenza della direzione E-W nelle aste fluviali comprese dal terzo al primo ordine. La minore frequenza di questa direzione verso gli assi centrali dei due graben fa ipotizzare una sua connessione con il sistema di faglie di trasferimento (*transfer fault*) che costituiscono le strutture sismotettoniche a minor energia che disarticolano i due graben.

Le direzioni ENE-WSW e NNW-SSE che compaiono nei primi ordini rispettivamente delle aste fluviali della zona di svincolo e dei settori centrali dei graben, possono costituire direttrici strutturali antiche riprese dalle linee di scorrimento superficiale in seguito a fenomeni di cattura oppure rappresentare un'espressione del regime tettonico attuale. Quest'ultima ipotesi ritengo sia la più convincente dal momento che sulle aree in cui si evidenziano queste direzioni si osserva la maggiore disorganizzazione dei reticoli, le più alte energie di rilievo e l'affioramento di litotipi più competenti, capaci di «registrare» le deformazioni fragili dello stress attuale. A supporto di questa interpretazione vi sono le interpretazioni di alcuni meccanismi focali di terremoti locali di minore intensità (Eva & Solarino, 1992).

Nel contesto delle interpretazioni sul campo di stress del Pleistocene superiore-Olocene sull'Appennino Settentrionale tali lineazioni possono costituire la conferma di un asse di massima compressione in direzione NNW-SSE così come evidenziato da dati stratigrafici e strutturali della Toscana centrale (Boccaletti & alii, 1997; Boccaletti & Sani, 1998). Non si può però escludere l'ipotesi che la direzione ENE-WSW rappresenti una linea di fratturazione secondaria associata alla zona di trasferimento orientata E-W. A questo proposito occorre notare che mostra una regolare rotazione oraria spostandosi verso il bordo apuano a parità di ordine gerarchico delle aste analizzate. Si può facilmente associare a questa direzione l'insieme di fratture e faglie a forte rigetto che delimitano il duomo apuano sul bordo settentrionale. Tale sistema di dislocazioni è probabilmente connesso ai notevoli movimenti verticali tuttora in atto e alla presenza di componenti trascorrenti che favorirebbero lo svincolo tra la struttura apuana e il graben lunigianese.

Un'altra ipotesi generale che si può trarre dai rapporti tra i diagrammi azimutali dei bacini settentrionali è quella della lieve rotazione oraria, a parità di ordine gerarchico, nell'orientazione dei segmenti fluviali avvicinandosi ai bacini del T. Gragnana e dell'alto T. Aulella. Questi due bacini ricadono essenzialmente nell'area dello svincolo tettonico tra i due graben e quindi la rotazione può essere interpretata come una conseguenza diretta del movimento a meccanismo destro.

- ARGNANI A., BERNINI M., DI DIO G.M., PAPANI G. & ROGLEDI S. (1997) - *Stratigraphic record of crustal-scale tectonics in the Quaternary of the Northern Apennines (Italy)*. Il Quaternario, 10 (2), 595-602.
- ANTIGA R., MORETTI A., PATACCA E., SCANDONE P. & TORRE R. (1988) - *Studio geologico strutturale della Garfagnana ai fini di una migliore caratterizzazione sismotettonica dell'area*. Rapporto interno Enel, Dip. Sc. della Terra, Pisa, 1-68.
- AVENA G.C., GIULIANO G. & LUPA PALMIERI E. (1967) - *Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali*. Boll. Soc. Geol. It., 86, 781-796.
- BALDACCI F. & PLESI G. (1987) - *Sul significato della finestra tettonica di Soraggio e sui rapporti tra i flysch arenacei oligomiocenici lungo la sezione Valle di Soraggio- M. Cusna- M. Prampa*. Mem. Soc. Geol. It., 39, 49-56.
- BARTOLINI C. & BORTOLOTTI V. (1971) - *Studi di geomorfologia e neotettonica. I - I depositi continentali dell'alta Garfagnana in relazione alla tettonica plio-pleistocenica*. Mem. Soc. Geol. It., 10, 208-245.
- BERNINI M. (1991) - *Le strutture estensionali della Lunigiana (Appennino Settentrionale): proposta di un modello deformativo*. Atti Tic. Sc. Terra, 34, 29-38.
- BISCI C., CALAMITA F. & DRAMIS F. (1988) - *Analisi computerizzata della orientazione dei tratti di reticolo idrografico e implicazioni neotettoniche: un esempio nell'area umbro-marchigiana*. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat. 1, 189-196.
- BOCCALETTI M. & COLI M. (Redattori). (1982) - *Carta strutturale dell'Appennino settentrionale (scala 1:250 000)*. C.N.R., P.F. Geodinamica Pubbl. 429.
- BOCCALETTI M., COLI M., EVA C., FERRARI G., LAZZAROTTO A., MERLANI F., NICOLICH R., PAPANI G., POSTPISCHL D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonophysics, 117, 7-38.
- BOCCALETTI M., BONINI M., GUALTIEROTTI A., MORATTI G., PICARDI L. & SANI F. (1997) - *Deformazioni quaternarie nell'Appennino Centro-Settentrionale: evidenze ed implicazioni*. Il Quaternario, 10 (2), 273-280.
- BOCCALETTI M. & SANI F. (1998) - *Cover thrust reactivations related to internal basement involvement during Neogene- Quaternary evolution of the northern Apennines*. Tectonics, 17, 112-130.
- BUONASORTE G., CICCACCI S., DE RITA D., FREDI P. & LUPA PALMIERI E. (1991) - *Some relations between morphological characteristics and geological structure in the Vulsini Volcanic Complex (Northern Lazio, Italy)*. Zeitschr. Geomorphol., Suppl. Bd. 82, 59-71.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990) - *Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*. Tectonics, 9, 1275-1303.
- CARMIGNANI L. (1985) - *Carta geologico-strutturale del complesso metamorfico delle Alpi Apuane, scala 1:25.000*. - Foglio Nord. Litografia Artistica Cartografica, Firenze.
- CARMIGNANI L., CERRINA FERONI A., DEL TREDICI S., FANTOZZI P.L., GIGLIA G., MARTINELLI P., MECCHERI M. & ROBBIANO A. (1992) - *Considerazioni sul profilo la Spezia-Reggio Emilia*. Stud. Geolog. Camerti, Vol. Spec. (1992)/2, 17-29.
- CASTALDINI D., GENEVOIS R., PANIZZA M., PUCCINELLI A., BERTI M., CUZZANI M.G., GHIROTTI M., PIERONI A., PUTZOLU P.P., SERANI A. & SIMONI A. (1996) - *Analysis of earthquake-induced surface effects in a sample area: a methodological approach in the Serchio River valley between Sillano and Piazza al Serchio (Garfagnana region, North Western Apennines, Italy)*. Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques.
- CENTAMORE E., CICCACCI S., DEL MONTE M., FREDI P., LUPA PALMIERI E. (1996) - *Morphological and morphometric approach to the study of the structural arrangement of northeastern Abruzzo (central Italy)*. Geomorphology 16, 127-137.

- CICCACCI S., D'ALESSANDRO L., FREDI P. & LUPA PALMIERI E. (1988) - *Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa allo studio dei processi di denudazione nel bacino idrografico del torrente Paglia (Toscana meridionale-Lazio settentrionale)*. Suppl. Geogr. Fis. Dinam., Quat., 1, 171-188.
- CICCACCI S., D'ALESSANDRO L., FREDI P., LUPA PALMIERI E. (1992) - *Relations between morphometric characteristics and denudational processes in some drainage basins in Italy*. Zeit. Geomorphol., N.F. 36 (1), 53-67.
- CICCACCI S., FREDI P., LUPA PALMIERI E. & SALVINI F. (1986) - *An approach to the quantitative analysis of the relation between drainage pattern and fracture trend*. International Geomorphology, II, Wiley 6 Sons, Chichester, 49-68.
- EVA C. & SOLARINO S. (1992) - *Alcune considerazioni sulla sismotettonica dell'Appennino nord-occidentale ricavate dall'analisi dei meccanismi focali*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. (1992)/2, 75-83.
- FAZZINI P. & GELMINI R. (1982) - *Tettonica trasversale nell'Appennino Settentrionale*. Mem. Soc. Geol. It., 24, 299-309.
- FEDERICI P.R. & RAU A. (1980) - *Note illustrative della neotettonica del Foglio 96 - Massa. Contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia*. Pubbl. n° 356, Progetto Finalizzato Geodinamica, C.N.R., 1365-1382.
- LUPA PALMIERI E., CICCACCI S., CIVITELLI G., CORDA L., D'ALESSANDRO L., DEL MONTE M., FREDI P., PUGLIESE F. (1995) - *Geomorfologia quantitativa e morfodinamica del territorio abruzzese: I - Il bacino idrografico del fiume Sinello*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 18, 31-46.
- MORETTI A. (1992) - *Evoluzione tettonica della Toscana settentrionale tra il Pliocene e l'Olocene*. Boll. Soc. Geol. It., 111, 459-492.
- NARDI R., PUCCINELLI A. & DE LUCIA P.L. (1989) - *Carta geologica della Garfagnana e della media valle del Serchio (Lucca): elementi «Magliano a Sera» e «Giuncugnano» (scala 1: 10.000)*. Tip. S.E.L.C.A., Firenze.
- NARDI R., DALLAN L., PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G. & TRIVELLINI M. (1991) - *Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella media valle del Serchio (Lucca). Carta geologica e della franosità degli elementi «Sillano», «Corfino», «Fosciandora» e «Coreglia» (scala 1:10.000)*. Boll. Soc. Geol. It., 110, 245-272.
- PATACCA E., SCANDONE P. & SARTORI R. (1990) - *Tyrrhenian basin and Apenninic arcs: kinematic relation since Late Tortonian times*. Mem. Soc. Geol. Ital., 45, 425-451.
- RAGGI G. (1985) - *Neotettonica ed evoluzione paleogeografica plio-pleistocenica del bacino del fiume Magra*. Mem. Soc. Geol. It., 30, 35-62.
- SORGI C., DEFFONTAINES B., HIPPOLYTE J.C. & CADET J.P. (1998) - *An integrated analysis of transverse structures in the northern Apennines, Italy*. Geomorphology, 25, 193-206.