

ALESSANDRO TIBALDI (*)

IDROGRAFIA E CRONOLOGIA TETTONICA: APPLICAZIONE DI UN METODO BASATO SULLA FOTOINTERPRETAZIONE

ABSTRACT: TIBALDI A., *Hydrography and tectonic chronology: application of a photointerpretation-based method.* (IT ISSN 031-9838, 1996).

In the preliminary phase of geological exploration of a region with recent tectonics, the fault trend characterized by the youngest motions can be rapidly recognized by the Coincidence Index statistically computed by matching the hydrographic and the fault networks. With the basic assumption that more recent is a fault and less it nucleated the surface waters, I classified the fault sets at various degrees of coincidence with streams by interpretation of aerial photos and satellite images at various scales in zones of Algeria, Tunisia and Ecuador with different hydrographic conditions and tectonic regimes. The results have been compared with the tectonic chronology based on field data.

KEY WORDS: Hydrography, Neotectonics, Tectonics, Photointerpretation.

RIASSUNTO: TIBALDI A., *Idrografia e cronologia tettonica: applicazione di un metodo basato sulla fotointerpretazione.* (IT ISSN 0391-9838, 1996).

Durante la fase geologico-esplorativa di una regione a tettonica recente, l'orientamento della famiglia di faglie con movimenti più giovani può essere riconosciuto con l'analisi dell'Indice di Coincidenza calcolato statisticamente dalla sovrapposizione tra reticolo idrografico e strutture fragili. Partendo dal presupposto che più una faglia è recente e meno ha concentrato lo scorrimento superficiale delle acque, il grado di coincidenza delle varie famiglie di faglie con i corsi d'acqua viene qui calcolato tramite fotointerpretazione ed analisi statistica in varie zone campione dell'Algeria, Tunisia ed Ecuador, caratterizzate da differenti condizioni idrografiche e strutturali. I risultati vengono poi confrontati con l'evoluzione tettonica dedotta in base a dati di terreno.

TERMINI CHIAVE: Idrografia, Neotettonica, Tettonica, Fotointerpretazione.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano, Via Mangiagalli 34, 20133-Milano.

Ringrazio C.M. Marino per avermi guidato nelle fasi iniziali del lavoro. Una versione preliminare del manoscritto è stata migliorata grazie ai suggerimenti di tre lettori del Comitato di Redazione anonimi. Questa ricerca è stata finanziata in parte coi fondi del Piano Spaziale Nazionale del Consiglio Nazionale delle Ricerche e con fondi MURST 60%.

INTRODUZIONE

In numerose applicazioni quali, per esempio, la valutazione dei rischi ambientali, il riconoscimento delle deformazioni fragili più recenti può rivestire un ruolo fondamentale. Per analisi a scala locale, le strutture quaternarie o attive vengono normalmente riconosciute tramite dati geologici, geomorfologici, geofisici, o possibilmente dalla loro combinazione. Nella fase preliminare di investigazione di un'ampia regione, un simile approccio è difficilmente realizzabile per problemi economici e di tempo. Le difficoltà sono ancora maggiori nei Paesi in via di sviluppo dove ai precedenti si aggiungono problemi logistici.

Al fine di minimizzare queste problematiche, MARINO & TIBALDI (1988a) hanno proposto per le aree a potenziale attività tettonica quaternaria, un metodo speditivo basato sulla fotointerpretazione e misurazione del grado di coincidenza fra aste fluviali e strutture fragili. Il risultato viene espresso sotto forma di un settore angolare che rappresenta le direzioni più probabili delle faglie con movimenti più recenti. Essendo l'approccio a vocazione regionale e statistica, la scala delle strutture investigate è tale per cui queste sono limitate alle faglie medie e principali (lunghezza $L \geq 5$ km), con esclusione quindi dei giunti tettonici il cui sviluppo superficiale è generalmente dell'ordine delle decine-centinaia di metri al massimo (RAMSAY & HUBER, 1983; POLLARD & AYDIN, 1988). Il metodo parte dalla considerazione che, in generale, più una faglia è recente e meno ha concentrato lo scorrimento delle acque superficiali, risultando in uno scarso riscontro della morfologia di tipo «depressione lineare» (fig. 1). Per ogni singola faglia, in questo processo subentrano numerose variabili quali la litologia, il grado di pervasività di fratturazione e quindi l'erodibilità localizzata della roccia, l'intensità delle precipitazioni, la velocità di scorrimento dell'acqua in funzione dell'inclinazione e della configurazione della superficie topografica, l'orientazione della faglia rispetto al gradiente topografico e la velocità di movimento tettonico lungo la faglia. L'influenza della litologia viene ridotta in quanto

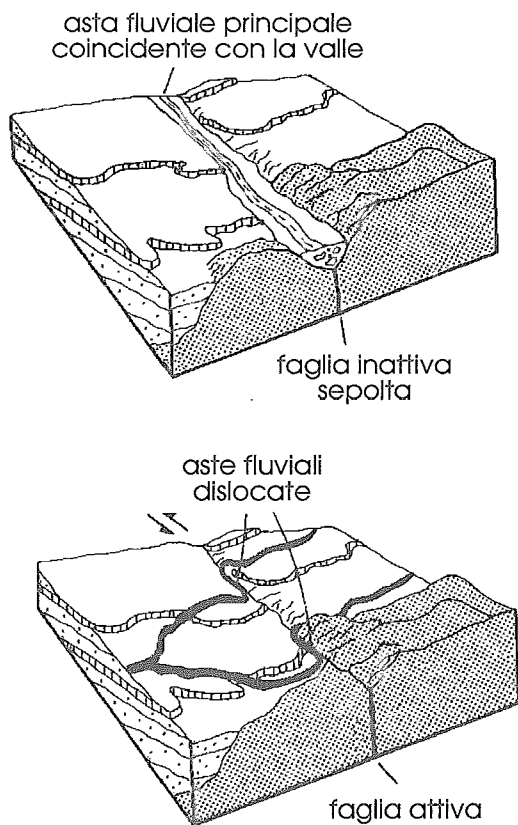


FIG. 1 - Esempio di controllo tettonico su un corso d'acqua nel caso di una faglia antica successivamente sepolta (in alto) e di dislocazione dell'asta fluviale nel caso di una faglia attiva (in basso).

FIG. 1. Example of tectonic control on a river stream in the case of an old fault which has been successively buried under alluvial deposits (upper scheme) and of dislocation of a river stream in the case of an active fault (lower scheme).

L'analisi è condotta suddividendo ogni area investigata in zone a comportamento geologico-strutturale omogeneo come desumibile dall'analisi bibliografica. Ad esempio, due faglie di uguale geometria ed età quaternaria sviluppate in due zone limitrofe con differente litologia, dovrebbero presentare il minor controllo sull'idrografia, ovvero la minore coincidenza tra aste fluviali e faglie, relativamente a ciascuna zona, controllo però che potrebbe differire in valore assoluto tra le due zone. Allo stesso modo, l'influenza delle condizioni climatiche viene ridotta in quanto i domini geologico-strutturali scelti corrispondono ad altrettante province fisiografiche. L'influenza dell'orientazione del pendio viene minimizzata dal fatto che le faglie considerate hanno lunghezza ≥ 5 km, e quindi ognuna di queste faglie dovrebbe attraversare più pendii.

L'influenza delle variabili viene inoltre ridotta dall'approccio regionale-statistico menzionato, che media le possibili specificità locali. In qualche caso infatti, uno dei parametri elencati potrebbe aver giocato un ruolo preponderante favorendo o inibendo la morfoselezione lungo una determinata faglia. Questo può determinare anomalie specifiche che influenzano minimamente il risultato finale in quanto espresso sotto forma di settore angolare di maggiore proba-

bilità delle direzioni delle faglie con movimenti più recenti; nel caso si voglia poi rivolgere l'attenzione a una faglia specifica, la verifica delle condizioni locali si renderà necessaria.

Infine, se alcune di queste faglie sono caratterizzate da movimenti tettonici con velocità sufficienti, la famiglia statisticamente meno coincidente con il reticolo idrografico dovrebbe contemporaneamente presentare la più alta frequenza di dislocazione delle aste fluviali. Numerosi lavori hanno approfondito quest'ultimo tema, riconoscendo che i movimenti lungo le faglie possono procedere ad una velocità maggiore rispetto alla capacità erosiva del fiume di rettificare il proprio percorso per riportarlo alla configurazione originaria (per esempio GAUDEMER & *alii*, 1987; BARTOLINI, 1992; CARRARO, 1993). Alla scala adottata, questa eventualità dovrebbe comunque essere limitata a pochi casi, in quanto sono necessari alti tassi di dislocazione di faglia per superare la capacità erosiva abbastanza accentuata delle aste fluviali considerate.

Nel presente lavoro sono state introdotte delle varianti al metodo di MARINO & TIBALDI (1988a) per affinare gli aspetti quantitativi, con applicazioni in alcune aree campione dell'Algeria, Tunisia ed Ecuador, caratterizzate da differenti condizioni idrografiche e tettoniche. Lo scopo è di definire oggettivamente il controllo tettonico sulle aste fluviali a seconda dello sviluppo del reticolo idrografico, calcolando anche il grado di confidenza dei risultati. I risultati vengono confrontati con l'evoluzione tettonica terziaria e quaternaria desunta dalla bibliografia e basata sull'analisi di terreno.

METODO E AREE CAMPIONE SELEZIONATE

La metodologia si avvale dell'estensivo utilizzo di fotografie aeree stereoscopiche ed immagini da satellite di adeguata risoluzione a seconda della scala e del dettaglio del rilievo richiesti. La procedura di lavoro qui adottata si articola in quattro fasi principali: 1) mappatura del reticolo idrografico, 2) mappatura delle faglie, 3) sovrapposizione tra le due carte e calcolo dell'Indice di Coincidenza (IC), 4) analisi nell'ambito della famiglia di faglie meno coincidente di eventuali dislocazioni di aste fluviali.

Le mappe delle faglie sono state ottenute tramite fotointerpretazione integrata da dati bibliografici. Le faglie sepolte dalle coltri alluvionali sono state quindi evidenziate dalla cartografia esistente. Nella maggior parte dei casi, le faglie con sviluppo superficiale pluri-chilometrico rappresentano la soglia minima da investigare e quindi una scala di lavoro tra 1:50.000 e 1:200.000 può essere la più adatta per le prime tre fasi del lavoro, anche per quanto riguarda la risoluzione del sistema. Una maggiore risoluzione può essere richiesta nell'ultima fase di analisi delle dislocazioni delle aste fluviali. Un corso d'acqua che venga in rapporto con una faglia attiva può presentare deviazioni dell'ordine delle decine di metri, il cui riconoscimento richiede scale di lavoro di 1:20 000-1:50 000. Si è quindi proceduto ad analisi a scale differenziate nelle varie regioni: 1:200 000-1:100 000 in Algeria e Tunisia, 1:75 000-1:25 000 in Ecu-

FIG. 2 - Carta del reticolo idrografico (lunghezza aste ≥ 5 km) dell'Algeria nord-orientale e della Tunisia desunta da immagini del satellite Landsat, sensore MSS, banda spettrale 7 e radar del Seasat SAR. Le linee tratteggiate delimitano le principali provincie fisiografiche, caratterizzate anche da una evoluzione geologico-strutturale omogenea, in cui sono stati calcolati i diagrammi dell'Indice di Coincidenza. A. Atlante, AM. Atlante Meridionale Tunisino, AS. Atlante Settentrionale Tunisino, BP. Blocco Pelagio, S. Piattaforma Sahariana, T. Tell.

FIG. 2 - Map of the hydrographic network (river stream length ≥ 5 km) of NW Algeria and of Tunisia, obtained from images of the Landsat satellite, MSS, band 7 and of the radar Seasat SAR. Dashed lines show the main physiographic provinces, characterized also by a homogeneous geological-structural evolution, where the diagrams of the Coincidence Index have been calculated. A. Atlas, AM. Southern Tunisian Atlas, AS. Northern Tunisian Atlas, BP. Pelagian Block, S. Saharian Platform, T. Tell.

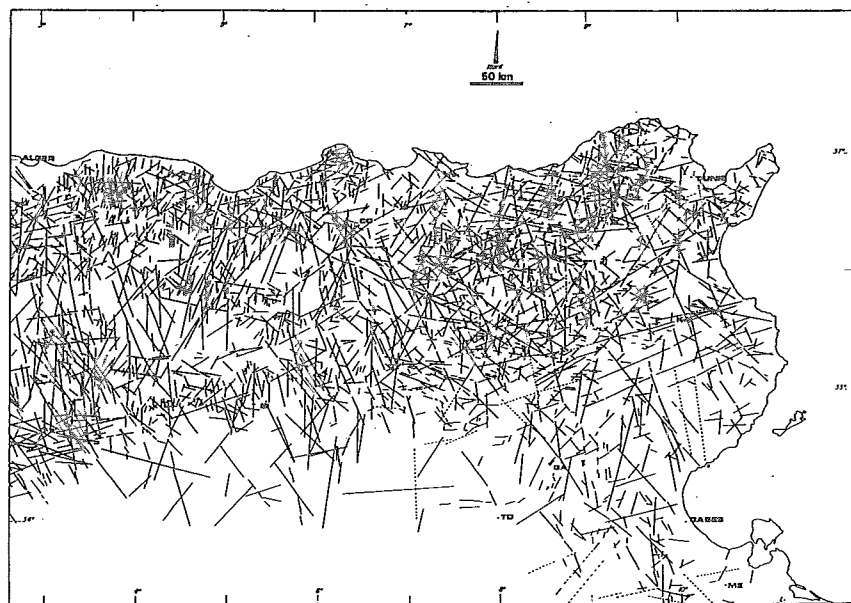
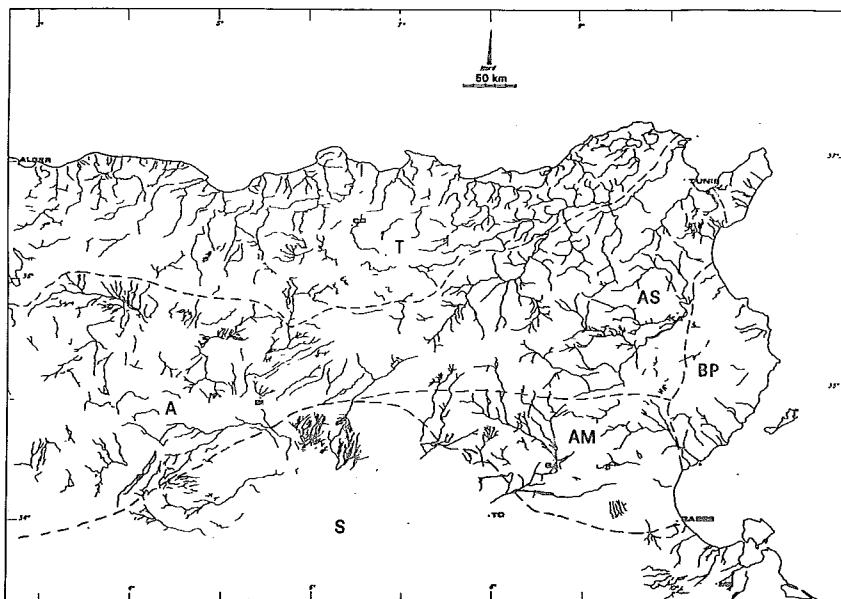


FIG. 3 - Carta delle faglie con sviluppo superficiale ≥ 5 km desunta da dati bibliografici e da immagini del satellite Landsat, sensore MSS, banda spettrale 7 e radar del Seasat SAR.

FIG. 3 - Map of the faults with length ≥ 5 km obtained from bibliography and from images of the Landsat satellite MSS, band 7 and radar Seasat SAR.

dor, al fine di contribuire ad individuare la scala migliore per possibili future applicazioni del metodo.

Le carte del reticolo idrografico e delle faglie derivano dallo stesso mosaico di riprese riprodotte su supporto fotografico (es. figg. 2, 3 e 4), ottenendo mappe sovrapponibili con eventuali errori derivanti essenzialmente dalla definizione del disegno che, in caso di utilizzo di pennino da 0,5 mm di diametro alla scala 1:50 000, può arrivare a ± 25 m.

Le faglie desunte dalla bibliografia sono state riportate mediante riconoscimento diretto di punti noti comuni al mosaico delle riprese e alle carte.

In Ecuador sono state utilizzate foto aree in bianco e nero nel visibile, mentre in Algeria e Tunisia immagini radar del Seasat SAR e del Landsat MSS in banda 7 (0,8-1,1 μ m). Nell'intervallo di lunghezza d'onda 0,8-1,1 μ m, la penetrazione in acqua è quasi nulla e di conseguenza il reticolo idro-

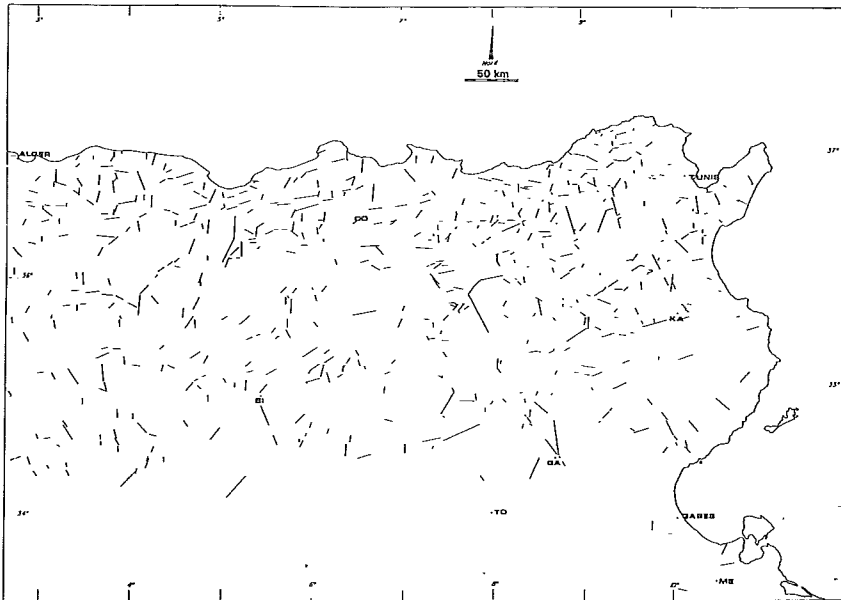


Fig. 4 - Carta delle faglie coincidenti con il reticolo idrografico desunta dalla sovrapposizione delle mappe delle figg. 2 e 3.

Fig. 4 - Map of the faults which are coincident with the hydrographic network obtained from the superimposition of the maps of figg. 2 e 3.

grafico superficiale è nettissimo per l'alto assorbimento, mentre l'eventuale umidità sub-alvea evidenzia il reticolo privo di flusso idrico superficiale e le faglie presentano le massime evidenze.

Le faglie fotointerpretate sono state riconosciute in base alla presenza di incisioni rettilinee con sezione a «V», allineamenti di intagli nelle creste, creste sdoppiate, gole, limiti di blocchi basculati, interruzioni di altre strutture tettoniche, quali per esempio le pieghe.

La quantificazione dell'IC tra fiumi e faglie è stata fatta in zone a comportamento geologico-strutturale omogeneo. In ogni zona sono state calcolate le percentuali azimutali di coincidenza per settori angolari di 15°, esprimendole come rapporto, in ogni settore, tra la somma delle lunghezze dei lineamenti coincidenti e la somma delle lunghezze di tutti i lineamenti presenti, e suddividendo i risultati in quattro classi in base alla distribuzione totale dei valori delle percentuali.

ANALISI DELLE AREE CAMPIONE

TUNISIA

Evoluzione strutturale e caratteristiche idrografiche

La Tunisia è suddivisibile in 5 zone fisiografiche caratterizzate da diverse evoluzioni geologico-strutturali (fig. 2). Il Tell è una zona a sovrascorrimenti Sud-vergenti lungo faglie di direzione da E-W a NE-SW di età neogenica (figg. 3-5). Procedendo verso Sud, l'Atlante Settentrionale è caratterizzato da faglie trascorrenti oligoceniche a direzione NNW-SSE (destra) e da E-W a ENE-WSW (sinistra). Nel Quaternario, le due zone sono accomunate da movimenti trascorrenti lungo faglie sinistre NNE-SSW e

destra WNW-ESE (BUROLLET, 1971; GLACON & ROUVIER, 1972; BOCCALETTI & *alii*, 1982; WILDI, 1983; in zone limitrofe COHEN & SCHAMEL, 1980; COHEN & *alii*, 1980). Il Tell e l'Atlante Settentrionale hanno il maggior sviluppo del reticolo idrografico in Tunisia. Quest'ultimo ha una frequenza di drenaggio di 23-32 aste fluviali / 2 500 km², e una densità di 105-145 km / 2 500 km².

A Sud, nell'Atlante Meridionale le strutture più antiche sono faglie inverse NE-SW Sud-vergenti associate a rare trascorrenti (ZARGOUNI, 1984) (fig. 5). Nel Pliocene si hanno faglie trascorrenti destra NNW-SSE ed inverse Sud-vergenti a direzione ENE-WSW, nel Quaternario trascorrenti destra NW-SE e inverse E-W Sud-vergenti (ZARGOUNI, 1984; HFAIEDH & *alii*, 1985; MARINO & TIBALDI, 1986, 1988b). Nel Blocco Pelagio (SALAJ, 1978), nel Quaternario sono segnalate faglie trascorrenti NW-SE e NNE-SSW e inverse ENE-WSW (HFAIEDH & *alii*, 1985). La frequenza di drenaggio è di 16-20 aste fluviali / 2 500 km² nell'Atlante Meridionale e < 16 / 2 500 km² nel Blocco Pelagio con valori di densità rispettivamente di 65-90 km / 2 500 km² e < 75 km / 2500 km².

Ancora più a Sud si passa alla Piattaforma Sahariana (fig. 2), piegata molto debolmente (BUROLLET, 1967). La frequenza di drenaggio è < 16 aste fluviali / 2 500 km², e densità < 75 km / 2 500 km².

A occidente manca totalmente il drenaggio superficiale essendovi il deserto del Sahara, qui conosciuto come Erg Orientale.

I risultati

La mappa delle faglie coincidenti e i diagrammi dell'IC sono rappresentati nelle figg. 4 e 5. Nel Tell la classe di minore coincidenza (0-15%) è rappresentata dai settori angolari N0°-30° e N90°-180°, dove spiccano i due settori N90°-120° e N150°-195°. Questo significa, per esempio,

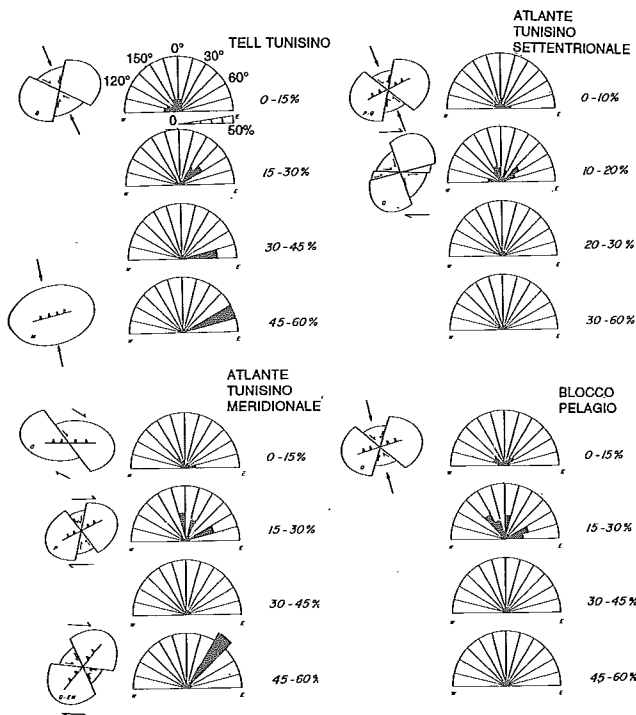


Fig. 5 - Ellissi: orientazione media e cinematica delle faglie sviluppatesi nelle varie zone della Tunisia durante le principali fasi tettoniche desunte da dati di terreno, la più recente è in alto per ogni zona. Semicerchi: diagrammi azimutali dell'Indice di Coincidenza (rapporto percentuale in ogni settore angolare di 15° tra la somma delle lunghezze dei lineamenti coincidenti e la somma delle lunghezze di tutti i lineamenti presenti in zone a comportamento geologico-strutturale omogeneo).

Fig. 5 - Ellipses: average orientation and kinematics of the faults developed in the various zones of Tunisia during the main tectonic phases obtained by field data, the most recent is the upper ellipse for each zone. Semicircles: azimuth diagrams of the Coincidence Index (ratio in percentage in each angular sector of 15° between the sum of the lengths of the coincident lineaments and the sum of the lengths of all the lineaments present in zones with a homogeneous geological-structural behaviour).

che nell'ambito delle faglie che coincidono con il reticolo idrografico in media tra lo 0% e il 15%, il 33% di esse ha direzione compresa tra N90° e N120° e dovrebbe quindi rappresentare una delle famiglie di faglie più recenti. Le famiglie di faglie con IC più elevati comprendono i settori angolari N30°-60°, N75°-90° e N60°-75°, in ordine crescente.

Nell'Atlante Settentrionale i settori di minore coincidenza sono N0°-15°, N30°-45°, N75°-90° e N105°-135°. Le faglie con maggiore IC hanno direzioni N15°-30°, N45°-75°, N90°-105° e N135°-180°. I diagrammi vuoti indicano che nessuna famiglia di faglie ha rapporti di coincidenza con il reticolo idrografico > 20%. Nell'Atlante Meridionale l'IC più basso è nei settori N75°-90° e N135°-165°, l'intermedio in N15°-30°, 60°-75° e 165°-180°. Il più alto è N30°-45°. Nel Blocco Pelagio il più basso IC è nei settori N30°-60°, N90°-135° e N165°-180°, e il più alto N0°-15°, N60°-90° e N135°-165°.

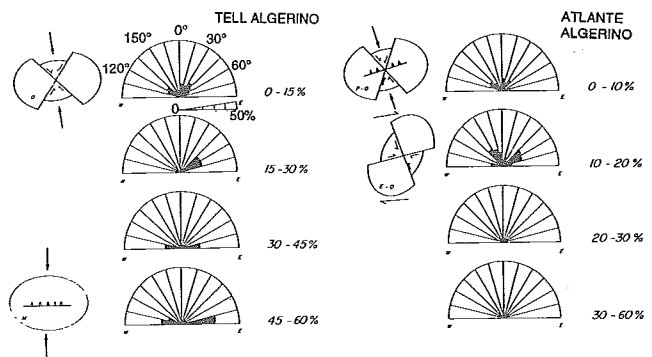


Fig. 6 - Ellissi: orientazione media e cinematica delle faglie sviluppatesi nelle varie zone studiate dell'Algeria durante le principali fasi tettoniche desunte da dati di terreno, la più recente è in alto per ogni zona. Semicerchi: diagrammi azimutali dell'Indice di Coincidenza. Per il calcolo di IC vedasi la didascalia di fig. 5 e il testo.

Fig. 6 - Ellipses: average orientation and kinematics of the faults developed in the various zones of Algeria during the main tectonic phases obtained by field data, the most recent is the upper ellipse for each zone. Semicircles: azimuth diagrams of the Coincidence Index. For the computation methodology of the CI see caption of fig. 5 and text.

ALGERIA

Evoluzione strutturale e caratteristiche idrografiche

L'area studiata corrisponde al settore nord-orientale dell'Algeria, caratterizzato da due domini geologico-strutturali: il Tell e l'Atlante (fig. 2). Il Tell qui ha subito nel Miocene una fase principale di raccorciamento con faglie di direzione E-W Sud-vergenti e pieghe associate (WILDI, 1983), seguita dallo sviluppo di faglie trascorrenti destre NW-SE e trascorrenti sinistre NE-SW attive anche nel Quaternario (BONOUAR, 1994) (figg. 3 e 5). La frequenza di drenaggio è di 20-30 aste fluviali / 2 500 km², per 80-150 km / 2 500 km² di densità. L'Atlante si è strutturato essenzialmente nell'Eocene-Oligocene con pieghe a traccia assiale NE-SW e faglie trascorrenti destre ENE-WSW e trascorrenti sinistre NNW-SSE (LAFITTE 1939; GUIRAUD, 1975; FERRARI & alii, 1990). Nel Plio-Quaternario si sviluppano per lo più deformazioni fragili date da faglie trascorrenti destre NW-SE, trascorrenti sinistre NNE-SSW ed inverse ENE-WSW (FERRARI & alii, 1990). La frequenza di drenaggio è di 15-25 aste fluviali / 2 500 km², per una densità di 75-115 km / 2 500 km².

I risultati

Nel Tell Algerino il settore angolare con l'IC più basso corrisponde a un elevato numero di faglie con orientazioni comprese in due gruppi: N0°-75° e N105°-165° (fig. 6). Ognuno di questi due gruppi ha una distribuzione unimodale culminante rispettivamente nei settori angolari N30°-45° e N120°-135°. L'IC intermedio è nei settori N45°-75° e N75°-105°. L'IC più alto è nel settore angolare N75°-120°.

Nell'Atlante l'IC più basso appartiene ai settori angola-

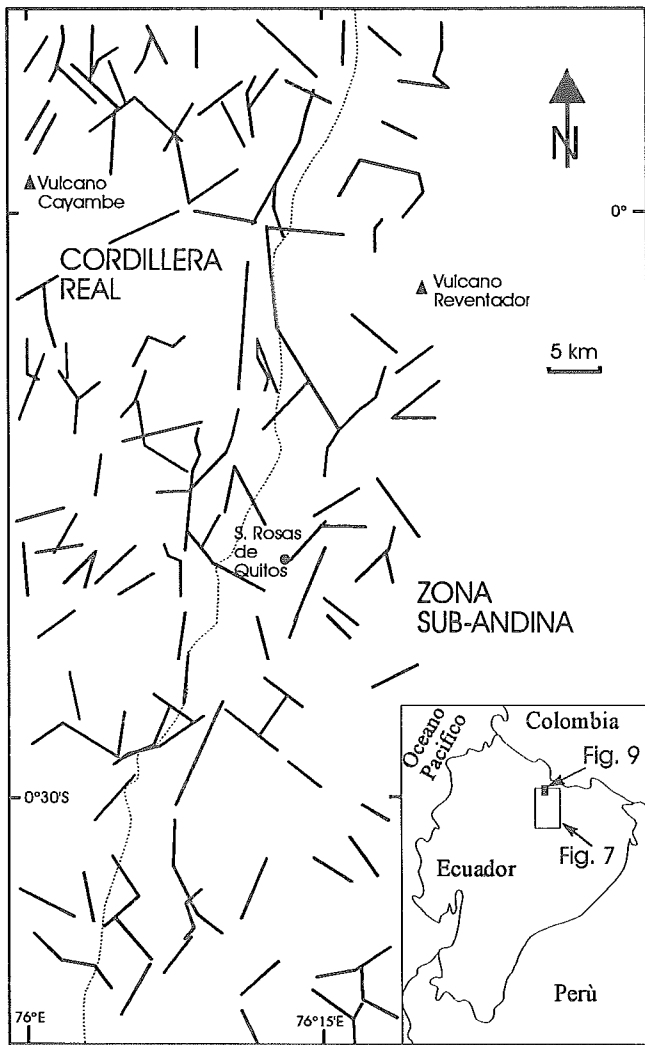


FIG. 7 - Carta delle faglie coincidenti con il reticolo idrografico e provincie fisiografiche studiate in Ecuador. Il reticolo idrografico è stato interpretato da foto aeree, le faglie da una integrazione tra foto aeree e dati bibliografici. Nel riquadro l'ubicazione dell'area studiata.

FIG. 7 - Map of the faults coincident with the hydrographic network and physiographic provinces studied in Ecuador. The hydrographic network has been interpreted from aerial photographs. Faults have been mapped by integration of bibliographic data with aerial photos. Box shows location of the area studied.

ri $N0^{\circ}-45^{\circ}$ e $N105^{\circ}-150^{\circ}$, mentre l'IC più alto è essenzialmente nei gruppi $N45^{\circ}-90^{\circ}$ e $N135^{\circ}-180^{\circ}$. La distribuzione è bimodale nel settore $N0^{\circ}-45^{\circ}$ e unimodale negli altri tre.

ECUADOR

Evoluzione strutturale e caratteristiche idrografiche

L'area studiata è la zona di passaggio tra la Cordigliera Andina e la Piattaforma Amazzonica e coincide essenzialmente con due fasce fisiografiche orientate secondo i meri-

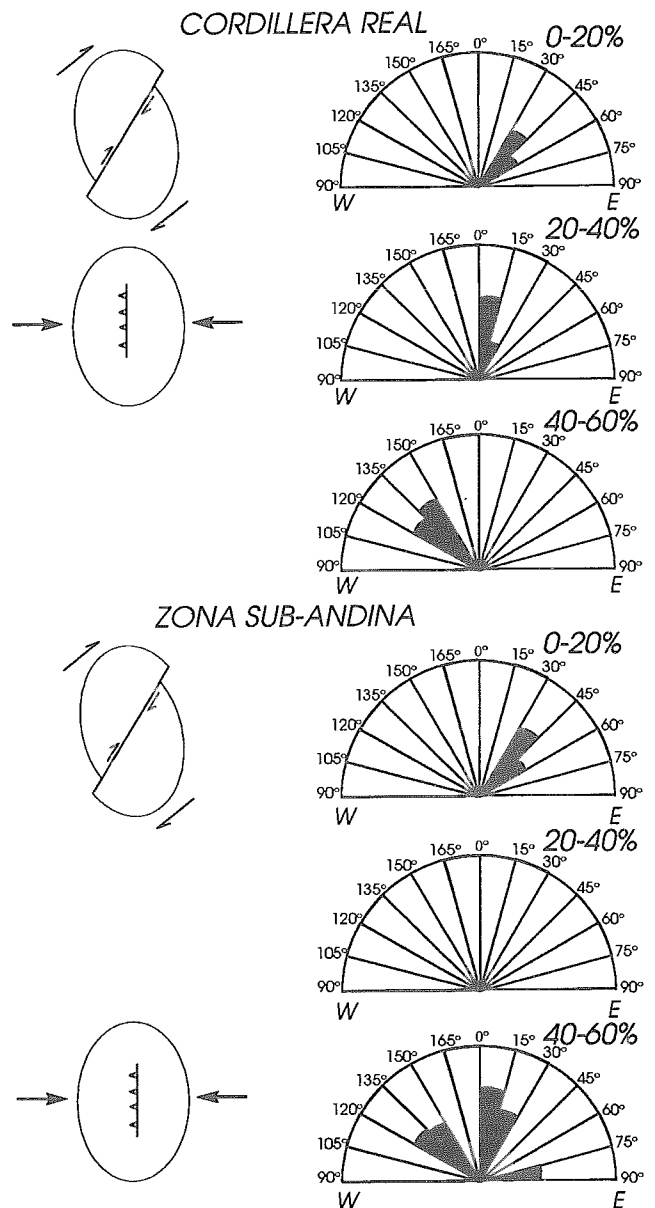


FIG. 8 - Colonna di sinistra: orientazione media e cinematica delle faglie sviluppatesi nelle varie zone studiate in Ecuador durante le principali fasi tettoniche desunte da dati di terreno, la più recente è in alto. Colonna di destra: diagrammi azimutali dell'Indice di Coincidenza. Per il calcolo di IC vedasi la didascalia di fig. 5 e il testo.

FIG. 8 - Left column: average orientation and kinematics of the faults developed in the various zones of Ecuador during the main tectonic phases obtained by field data, the most recent is the upper ellipse for each zone, Right column: azimuth diagrams of the Coincidence Index. For the computation methodology of the CI see caption of fig. 5 and text.

diani conosciute come Cordillera Real e Zona Subandina (fig. 7). In queste zone la densità e intensità delle deformazioni e la quota diminuiscono gradualmente verso est. Sep-pure l'inizio delle fasi deformative sia precoce nella Cordillera Real (EGUEZ & ASPDEN, 1993), questi domini geologico-strutturali sono accomunati dallo sviluppo inizia-

TABELLA 1 - Cronologia tettonica relativa basata sull'Indice di Coincidenza

TABLE 1 - Relative tectonic chronology based on the Coincidence Index

	Tell Algerino	Tell Tunisino	Atlante Algerino	Atlante Tunisino nord	Atlante Tunisino sud	Blocco Pelagio Tunisino	Cordillera Real Ecuador	Zona Sub-Andina Ecuador
Direzione faglie più recenti	120-135 30-45	90-120 150-195	0-45 105-150	0-15 30-45 75-90 105-135	75-90 135-165	30-60 90-135 165-180	30-60	30-60
Direzione faglie relativamente più antiche	45-75 75-105 75-120	30-60 75-90 60-75	45-90 135-180	15-30 45-75 90-105 135-180	15-30 60-75 165-180 30-45	0-15 60-90 135-165	0-30 120-150	0-30 120-150 75-90

TABELLA 2 - Attendibilità del metodo in relazione alle regioni studiate e alle condizioni climatiche

TABLE 2 - Reliability of the method in relation with study regions and climatic conditions

	Tell Algerino	Tell Tunisino	Atlante Algerino	Atlante Tunisino nord	Atlante Tunisino sud	Blocco Pelagio Tunisino	Cordillera Real Ecuador	Zona Sub-Andina Ecuador
indice di confidenza	65%	67%	64%	60%	81%	30%	72%	75%
indice di confidenza			>60%		30%-60%		<30%	
frequenza di drenaggio			>23 aste fluv./2500 km ²		16-23 aste fluv./2500 km ²		<16 aste fluv./2500 km ²	
densità di drenaggio			>105 km/2500 km ²		75-105 km/2500 km ²		<75 km/2500 km ²	

le di faglie inverse a direzione N-S, seguito nel Plio-Quaternario da trascorrenza destra lungo faglie NNE-SSW e NE-SW (PASQUARÈ & *alii*, 1990; TIBALDI & *alii*, 1995).

Nella fascia studiata della Cordillera Real e della Zona Subandina, la frequenza di drenaggio è di 26-46 aste fluviali / 500 km², per una densità di 165-247 km / 500 km².

I risultati

Nella Cordillera Real, il settore angolare con l'IC più basso è N30°-60°, l'IC intermedio corrisponde al settore angolare N0°-30°, mentre l'IC più alto è N120°-150° (fig. 8).

Nella Zona Subandina l'IC più basso corrisponde a N30°-60°. L'IC più alto è rappresentato nei settori N0°-30°, N120°-150° e N75°-90°, in ordine decrescente di frequenza.

DISCUSSIONE

Confrontiamo innanzitutto le cronologie relative basate su IC uguali in zone diverse (tab. 1). Nell'Atlante Tunisino Settentrionale e nell'Atlante Algerino, i più bassi IC appartengono a settori angolari simili coerentemente con la riconosciuta continuità geologico-strutturale della catena (LETOUZEY & TREMOLERS, 1980; LE PICHON & *alii*, 1988), mentre l'Atlante Meridionale Tunisino presenta un'evoluzione distinta. Il Tell, che dovrebbe avere una storia comune sia in Algeria che Tunisia, presenta invece una cronologia tettonica, desunta dall'IC, con settori angolari diversi

(tab. 1). Analizzando singolarmente le due zone, nel Tell Tunisino i settori angolari a più basso IC corrispondono effettivamente alle faglie più recenti desunte dai dati di terreno (fig. 5). Osservando che le cronologie tettoniche relative basate sui due metodi coincidono anche nel Tell Algerino (fig. 6), si può concludere che l'IC ha registrato le variazioni geometriche corrispondenti effettivamente ad una rotazione antioraria delle direttrici deformative dal Tell Algerino a quello Tunisino nell'ambito dello stesso evento tettonico. In Ecuador la distribuzione dell'IC è molto simile nelle due zone studiate, in accordo con l'evoluzione a direttrici strutturali uguali ma di differente intensità e età assoluta.

Passando ora in rassegna le cronologie nelle singole zone, si può osservare che l'evoluzione tettonica relativa desunta dall'IC e quella ottenuta dai dati di terreno coincidono in generale in tutte le aree campione investigate, presentando localmente degli scarti diversi. Le relazioni sono state quindi verificate tramite un confronto statistico di maggiore dettaglio al fine di valutare il grado di confidenza dei risultati, espresso come rapporto percentuale tra la dispersione dei valori angolari desunti con l'IC e quelli basati sui dati di terreno. Il risultato complessivo che tiene conto della dispersione dell'IC più basso ha un valore del 67% nel Tell Tunisino (tab. 2). In altri termini, il 67% delle faglie classificate come le più recenti con l'IC è confermato con i dati bibliografici di terreno, mentre il restante 33% di faglie ha un'età relativa diversa. Nell'Atlante Tunisino Settentrionale, la dispersione dei risultati sale leggermente ed è stata quantificata in un 60% di grado di confidenza. Nell'Atlante Tunisino Meridionale, l'indice di confidenza è risultato del 81%. Nel Blocco Pelagio le relazioni con le classi di coincidenza danno un grado di confidenza del 30%, per cui qui il metodo non è risultato sufficientemen-



Fig. 9 - Esempio di dislocazione di aste fluviali ad opera di una faglia trascorrente destra di direzione NNE-SSW attiva nell'Olocene, Cordillera Real, Ecuador. Il Nord è verso l'alto e la faglia attraversa diagonalmente la foto. Il lato minore della foto corrisponde a circa 6 km. Per l'ubicazione vedasi fig. 7.

FIG. 9 - Example of dislocation of a river stream by a NNE-SSW striking, right-lateral transcurrent fault, active also during the Holocene, Cordillera Real, Ecuador. North is toward the upper side and the fault diagonally crosses the image. The shorter side of the picture corresponds to about 6 km. For location see fig. 7.

te discriminatorio. Nel Tell Algerino l'indice di confidenza è del 65%. Nell'Atlante Algerino, i picchi delle dispersioni unimodali corrispondono a un indice di confidenza del 64%.

In Ecuador, nella Cordillera Real la fase tettonica relativamente più antica che ha dato luogo alle faglie inverse N-S controlla maggiormente il reticolo idrografico rispetto alle faglie trascorrenti destre NE-SW più recenti che coincidono statisticamente meno con le aste fluviali sia nella Cordillera Real che nella Zona Subandina e che presentano vistosi fenomeni di dislocazione dei corsi d'acqua (fig. 8, esempio in fig. 9). L'indice di confidenza è del 72% nella Cordillera Real e del 75% nella Zona Subandina (tab. 2). In conclusione, confrontando i risultati sopra esposti con le caratteristiche idrografiche delle varie zone e ricordando

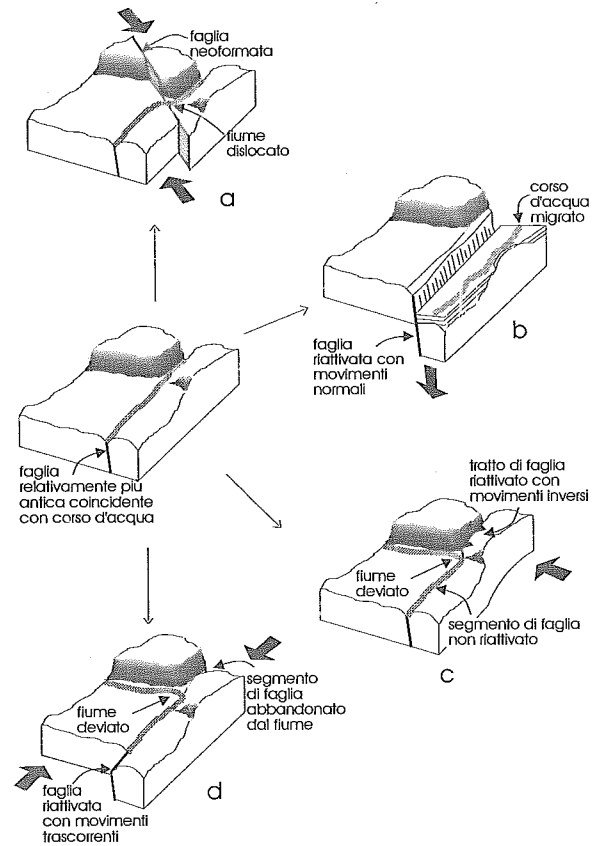


Fig. 10 - Ipotesi su alcuni casi possibili di ridotta coincidenza tra corsi d'acqua e faglie nel caso di strutture neofornate (a) e strutture riattivate secondo vari movimenti tettonici (b-d). La situazione originaria corrisponde allo schema centrale a sinistra. Le frecce grosse indicano la direzione di deformazione principale.

Fig. 10 - Sketch of some possible case of reduced coincidence between river streams and faults for newly-formed fault planes (a) and reactivated faults with different tectonic motions (b-d). The starting configuration is represented in the central-left sketch. Large arrows show the direction of main deformation.

la vocazione essenzialmente regionale-esplorativa del metodo, emerge che l'IC può essere utile con un grado di attendibilità dei risultati $> 60\%$ nelle zone in cui si hanno più di 23 aste fluviali / 2 500 km² per una densità di drenaggio > 105 km / 2 500 km² (tab. 2). L'indice di confidenza è compreso tra 30 e 60% se la frequenza di drenaggio è 16-23 aste fluviali / 2 500 km² con densità di 75-105 km / 2 500 km², e scende a $< 30\%$ con < 16 aste fluviali / 2 500 km² e densità < 75 km / 2 500 km². L'effettiva minore coincidenza statistica delle faglie più recenti con i corsi d'acqua può essere spiegata con il fatto che un certo numero di queste faglie possano essere neofornate e quindi presentare una traccia in superficie svincolata dalla topografia dominante precedente (fig. 10a). È plausibile ipotizzare che la parte restante delle faglie affioranti a bassa coincidenza rappresenti strutture riattivate. In questo caso si suggeriscono tre possibilità: 1) la faglia non ha mai incanalato le acque superficiali per mancanza di orientazione opportuna rispetto al gradiente topografico, 2) la faglia è

rimasta sepolta, e quindi non ha mai avuto modo di controllare l'idrografia, per affiorare solamente in tempi recenti in seguito a propagazione in superficie del piano di movimento, 3) la faglia, già in rapporto di sovrainposizione con un corso d'acqua, presenta in tempi recenti movimenti che tendono a variare l'assetto morfologico del territorio con conseguente possibile netta deviazione o graduale migrazione del corso d'acqua per la comparsa di ostacoli topografici (fig. 10 b-d). Quest'ultima possibilità è vincolata alla presenza di un tasso d'erosione inferiore al tasso di movimento della faglia e comporta che il corso d'acqua abbandoni in parte o totalmente il segmento di faglia riattivato.

Dal punto di vista, infine, di una possibile diversa influenza dei vari tipi di fagliazione sull'IC, si propongono qui delle osservazioni preliminari, in quanto un'analisi sufficientemente approfondita deve ancora essere effettuata in zone con fagliazione normale. Dall'analisi comparata di tutti i dati qui presentati, sembra che le faglie inverse esercitino un maggior controllo generale sul reticolo idrografico rispetto alle faglie trascorrenti e transpressive, imputabile probabilmente ai relativamente più elevati incrementi di gradiente topografico collegati a questo tipo di deformazione.

BIBLIOGRAFIA

- BALDOCK J.W. (1982) - *Geologia del Ecuador*. Direccion General de Geologia y Minas, Quito, 70 pp.
- BARTOLINI C. (1992) - *I fattori geologici delle forme del rilievo*. Pitagora, Bologna, 193 pp.
- BOCCALETTI M., CONEDERA C., DAINELLI P. & GOCEV P. (1982) - *The recent (Miocene-Quaternary) tectonic System of the western Mediterranean Region*. Journ. Petr. Geol., 5(1), 30-49.
- BONOUAR D. (1994) - *The seismicity of Algeria and adjacent regions*. Ann. Geof., 37(4) 459-862.
- BUROLLET P.F. (1967) - *General Geology of Tunisia*, in: Guidebook to the Geology and History of Tunisia. Petrol. Expl. Soc. of Libya, 9th Ann. Field. Conf., 51-58.
- BUROLLET P.F. (1971) - *Remarques Géodynamiques sur le Nord-est de la Tunisie*. C.R. Somm. Soc. Geol. France, 8, 411-414.
- CARRARO F. (1993) - *Criteri per evidenziare l'evoluzione recente di faglie*. Il Quaternario, 6(1), 15-26.
- COHEN C.R. & SCHAMEL S. (1980) - *Progressive Neogene deformation in Southern Edil, Tunisian Atlas*. AAPG Bull., 64, 423-427.
- COHEN C.R., SCHAMEL S. & BOYD-KAYGI P. (1980) - *Neogene deformation in northern Tunisia: Origin of the eastern Atlas by microplate-continental margin collision*. Geol. Soc. Am. Bull., 1, 91, 225-237.
- EGUEZ & ASPDEN J.A. (1993) - *The Mesozoic-Cenozoic evolution of the Ecuadorian Andes*. Proceed. II ISAG, Oxford, ORSTOM, 179-181.
- FERRARI L., TIBALDI A., BRIZZOLARA L. & MAFFIOLI A. (1990) - *Eocene simple shear and Pliocene pure shear folding in the central-eastern Algerian Atlas*. Terra Nova, 2, 653-660.
- GAUDEMER Y., TAPPONNIER P. & TURCOTTE D.L. (1987) - *River offsets across active strike-slip faults*. Ann. Tectonicae, 3(2), 55-76.
- GLACON G. & ROUVIER M.H. (1972) - *Age des mouvements tectoniques majeurs en Tunisie septentrionale*. C.R. Acc. Sc. Paris, 274, 1257-1260.
- GUTRAUD R. (1975) - *Notice explicative de la carte géologique 1:50.000 El Kantara*. Serv. Géol. de l'Algérie, Algiers.
- HFAIEDH M., CHADI M. & ALLOUCHE M. (1985) - *Seismicity of Tunisia and neighbouring areas*. European Geotraverse. Proceed II EGT Workshop. The Southern Segment, Venice, 241-246.
- LAFFITTE R. (1939) - *Etude géologique de l'Aures*. Thèse, Université de Paris et Bull. Serv. carte géol. Algérie, 15, 484 pp.
- LE PICHON X., BERGERAT F. & ROULET M.J. (1988) - *Plate kinematics and tectonics leading to the Alpine belt formation; A new analysis*. Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 218, 111-131.
- LETOUZEY J. & TREMOLIERI P. (1980) - *Paleo-stress field around the Mediterranean since the Mesozoic derived from microtectonics: comparisons with plate tectonic data*. Mem. Bur. Rech. Géol. Min., 115, 261-273.
- MARINO C.M. & TIBALDI A. (1986) - *Applicazioni del telerilevamento agli studi geodinamici: L'evoluzione cinematica dell'Atlante Tunisino*. Ist. Lombardo (Rend. Sc.), B120, 63-82.
- MARINO C.M. & TIBALDI A. (1988a) - *Cronologia tettonica relativa mediante quantificazione del controllo strutturale sul reticolato idrografico telerilevato*. Ist. Lombardo (Rend. Sc.), B122, 293-315.
- MARINO C.M. & TIBALDI A. (1988b) - *Use of Landsat and Seasat data as a tool in kinematic analysis: The Tunisian Atlas*. Int. Journ. Rem. Sens., 9, 10-11, 1659-1673.
- PASQUARÈ G., TIBALDI A. & FERRARI L. (1990) - *Relationships between plate convergence and tectonic evolution in the Ecuadorian active thrust belt*. In: AUGUSTHITIS S.S. (ed.), *Critical Aspects of Plate Tectonic Theory*. Theophrastus Publications. Athens, Greece, 365-388.
- POLLARD D.D. & AYDIN A. (1988) - *Progress in understanding jointing over the past century*. Geol. Soc. Am. Bull., 100, 1181-1204.
- RAMSAY J.G. & HUBER M.L. (1983) - *Techniques of modern structural geology*. Vol. 1, Academic Press, London, 307 pp.
- SALAJ J. (1978) - *The geology of the Pelagian Block: The Eastern Tunisian Platform*, in: NAIRN A.E.M., KANES W.H. & STEHLI F.G. (ed.), *The Ocean Basins and Margins, the Western Mediterranean*. Plenum Press, New York, 361-416.
- TIBALDI A., FERRARI L. & PASQUARÈ G. (1995) - *Landslide triggered by earthquakes and their relationships with faults and mountain slope geometry: an example from Ecuador*. Geomorphology, 11, 215-226.
- WILDI W. (1983) - *La chaîne tello-rifaine (Algerie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et evolution du Trias au Miocene*. Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys., 24(3), 201-297.
- ZARGOUNI F. (1984) - *Style et chronologie des deformations des structures de l'Atlas tunisien meridional*. C.R. Ac. Sc. Paris, 229, 2, 71-76.