

IL SISTEMA COMPRESSIONE-DISTENSIONE IN APPENNINO

MELETTI C.[°], PATACCA E.^{°°}, SCANDONE P.^{°°}

[°] CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Via Nizza, 128, Roma. Dipartimento di Scienze della Terra. Via S. Maria, 53, Pisa.

^{°°} Dipartimento di Scienze della Terra. Via S. Maria, 53. Pisa.

Da molti anni è stata riconosciuta, in Appennino, una migrazione spazio-temporale del sistema bacino tirrenico-catena-avanfossa, con un fronte di distensione che "insegue" a distanza ravvicinata un fronte di compressione in progressivo avanzamento da occidente verso oriente (Elter *et al.* 1975). Tra i numerosi modelli proposti in letteratura (si vedano, ad es., Biju-Duval e Montadert 1977; Boccaletti e Dainelli 1982; Boccaletti e Guazzone 1972, 1974; Boccaletti *et al.* 1984, 1985, 1990; Carmignani e Kligfield 1990; Dewey *et al.* 1989; Doglioni 1991; Doglioni *et al.* 1991; Finetti e Del Ben 1986; Hsü 1977; Kastens *et al.* 1987, 1988, 1990; Lavecchia 1988; Lavecchia e Stoppa 1990, 1991; Locardi 1982, 1985, 1988; Locardi e Nicolich 1988; Malinverno e Ryan 1986; Mantovani 1982; Mantovani *et al.* 1990, 1992; Patacca e Scandone 1987, 1989; Patacca *et al.* 1990, 1993; Rehault *et al.* 1987; Sartori 1989, 1990; Scandone 1979; Selli 1985; Serri 1990; Serri *et al.* 1991; Tapponier 1977; Van Bemmelen 1972; Wezel 1985), quelli che fanno riferimento ad un meccanismo di "roll-back" della piastra d'avampaese in subduzione sotto l'Appennino giustificano meglio, a nostro parere, i fatti geologici e geofisici osservati di ordine maggiore. Una subduzione della litosfera padano-adriatico-ionica nella quale la velocità di arretramento dell'asse di flessura superi la velocità di convergenza con la litosfera europea (nel nostro caso Corsica-Sardegna) può ragionevolmente spiegare, in termini cinematici:

- l'apertura del bacino tirrenico in posizione avansarco rispetto alla Corsica e alla Sardegna che avevano ormai completato la loro rotazione (per i tempi di durata della rotazione si veda Vigliotti e Kent 1990), nonché la sua successiva evoluzione a bacino retroarco alle spalle del nuovo sistema arco-fossa (Appennino post-tortoniano). Il bacino tirrenico, in definitiva, si sarebbe aperto con una velocità di estensione pari alla differenza tra la velocità di arretramento dell'asse di flessura nella litosfera discendente e la velocità di convergenza. Quest'ultima può risultare nulla o può addirittura assumere valori negativi se a sud del parallelo di Genova i vettori di spostamento della litosfera padano-adriatico-ionica rispetto a quella europea non hanno avuto, in tempi post-tortoniani, componenti verso occidente;

- la migrazione spazio-temporale del sistema appenninico arco-fossa indotta dall'arretramento dell'asse di flessura della litosfera padano-adriatico-ionica;
- la migrazione del magmatismo della Provincia Toscana (Barberi *et al.* 1971; Civetta *et al.* 1978) e, più in generale, dell'intero magmatismo neogenico-quadernario all'interno dell'arco appenninico settentrionale (Serri *et al.* 1991);
- la migrazione dei processi estensionali sia nel Tirreno settentrionale (Bartole *et al.* 1991) sia nel Tirreno meridionale (Patacca *et al.* 1990; Sartori 1990);
- la natura del magmatismo tirrenico e peritirrenico (Beccaluva *et al.* 1984, 1989, 1991; Civetta *et al.* 1989; Di Girolamo 1978; Innocenti *et al.* 1992; Peccerillo 1985; Peccerillo *et al.* 1990; Poli *et al.* 1991; Serri 1990; Serri *et al.* 1991);
- l'esistenza di una "radice litosferica", vale a dire di un corpo con elevata velocità di propagazione delle onde sismiche, fino a circa 200 chilometri di profondità sotto l'Appennino Settentrionale (Amato *et al.* 1991; Babuska e Plomerova 1990; Panza *et al.* 1980; Scarpa 1982; Suhadolc e Panza 1989) e la presenza, nella stessa zona, di terremoti subcrostali (Amato e Selvaggi 1991; Selvaggi e Amato 1992; Tomaselli *et al.* 1992) fino a quasi 100 chilometri di profondità;
- la presenza di terremoti profondi nel basso Tirreno alle spalle dell'Arco Calabro (Anderson e Jackson 1987; Gasparini *et al.* 1982; Giardini e Velonà 1991) dove la velocità di arretramento dell'asse di flessura della litosfera in subduzione ha raggiunto i valori massimi, superiori ai 5 cm/anno (Patacca *et al.* 1990, 1993).

Un meccanismo di tipo *roll-back* soddisfa, dunque, i principali aspetti dell'evoluzione cinematica della coppia Tirreno-Appennino, ma importanti punti di domanda restano ancora senza risposta:

- 1) pur considerando i processi di *roll-back* la causa prima della migrazione del sistema arco-fossa e dell'apertura del bacino retroarco, qual'è il "motore" che esercita sulla placca in subduzione la pressione sufficiente per avere il distacco della sua porzione pellicolare e qual'è il "sistema di trasmissione" che permette l'avanzamento delle coltri verso l'avampaese?
- 2) se i "Graben" intraappenninici sono l'espressione superficiale della distensione tirrenica (v. ad es. Boccaletti *et al.* 1985), come mai in certi segmenti della catena (es. Marche, Abruzzo) lo spazio fra le strutture in distensione più orientali e la proiezione in superficie delle strutture in compressione (o transpressione) attive si riduce praticamente a zero? Dovremmo paradossalmente concludere che in

certi settori della catena fronte della distensione e fronte della compressione coincidono. Oppure dovremmo altrettanto paradossalmente ammettere che le faglie distensive abbiano la loro compensazione varie decine di chilometri ad ovest della loro emergenza, con una traiettoria a basso angolo relativamente superficiale e pressoché parallela al *sole-thrust* del sistema;

- 3) se i "Graben" intraappenninici sono impostati sull'emergenza delle faglie distensive tirreniche, perché le faglie maestre che limitano alcune di queste depressioni (es. destra orografica del Serchio in Garfagnana) determinano ribassamenti massimi verso l'Adriatico anziché verso il Tirreno?
- 4) perché il vulcanismo quaternario si è fermato decine di chilometri ad occidente delle depressioni intraappenniniche più esterne se queste ultime marcano il fronte attivo della distensione?
- 5) perché, infine, in un ambiente di *rift*, quale dovrebbe essere quello della fascia dei "Graben" intraappenninici, si sovrappongono nel tempo eventi distensivi ed eventi compressivi? Si vedano, al riguardo, i lavori di Boccaletti *et al.* (1987, 1991), Cerrina Feroni *et al.* (1983, 1989), Martelli *et al.* (1989), Pertusati *et al.* (1978, 1980), Plesi e Cerrina Feroni (1979).

In questa nota proponiamo una rilettura dei rapporti tra litosfera e astenosfera in Appennino dalla quale scaturisce la possibilità di dare alla fascia dei "Graben" intraappenninici, e con essa al fronte della distensione, un'interpretazione diversa da quella comunemente accettata. Lo schema che presentiamo è stato costruito sull'arco appenninico settentrionale dove non sembrano essersi verificate significative variazioni del regime geodinamico tra il Tortoniano superiore/Messiniano e l'Attuale. Questo schema è trasferibile all'arco appenninico meridionale (modificando, ovviamente, i valori di velocità del *roll-back* della litosfera dell'avampaese e i valori di velocità di apertura del bacino retroarco) per l'intervallo temporale compreso tra il Tortoniano superiore/Messiniano e la fine del Pleistocene inferiore. A partire dal Pleistocene medio lo schema non è più applicabile dal momento che, quantomeno in corrispondenza del segmento apulo, non soltanto la subsidenza flessurale nella piastra d'avampaese è cessata ma addirittura si è invertito il senso di movimento (v. Cinque *et al.* 1993).

La figura 1 mostra una sezione schematica attraverso l'Appennino, dall'Adriatico al Tirreno, secondo la direttrice Ancona-Argentario. Procedendo da NE verso SW sono rappresentati:

- la piastra adriatica che immerge sotto la catena appenninica. Gli spessori crostali e litosferici sono tratti dal Modello Strutturale d'Italia (CNR - Progetto Finalizzato Geodinamica 1990);

- il fronte della compressione appenninica e, in grigio, il settore di catena all'interno del quale si distribuiscono i bacini intermontani ("Graben") plio-pleistocenici. In questo settore sono contenute anche le strutture sismogenetiche che in tempi storici hanno rilasciato i terremoti di maggiore energia. Per chiarezza di disegno è stato ritenuto opportuno non riportare i numerosi eventi superficiali che cadono all'interno della zona retinata;

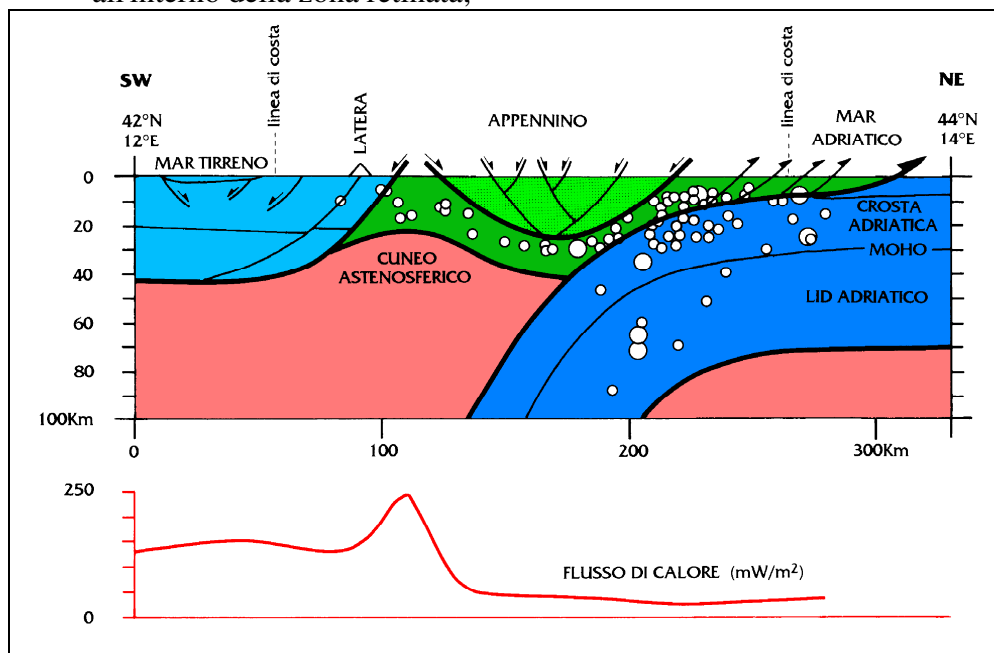


Fig. 1 - Interpretazione della struttura profonda dell'Appennino Settentrionale. I terremoti, riferiti al periodo gennaio 1983-marzo 1991, sono tratti da Amato e Selvaggi (1991). L'andamento del flusso di calore è tratto da Mongelli e Zito (1991).

- il margine tirrenico della catena, caratterizzato da strutture distensive a sviluppo regionale e da vulcanismo pleistocenico. L'elevato flusso di calore (Mongelli e Zito 1991) e la bassa velocità di propagazione delle onde sismiche sia nella crosta che nel mantello superiore (Calcagnile e Panza 1981; Minelli *et al.* 1991; Suhadolc e Panza 1989) suggeriscono una forte risalita del mantello astenosferico, ma la reale geometria del sistema litosfera-astenosfera è ancora mal definita (v. Della Vedova *et al.* 1991). La risalita di un cuneo astenosferico in corrispondenza delle massime anomalie positive del flusso di calore residuo (v. Mongelli e Zito 1991, fig. 6) è in accordo con i dati geofisici disponibili (v. anche Locardi e Nicolich 1988, che nella stessa area ipotizzano la risalita di

un astenolite) ma non può essere ritenuta provata. Restiamo pertanto nel campo di una ipotesi di lavoro, sia pur plausibile;

- il bacino nord-tirrenico, largamente interessato da strutture estensionali ormai inattive.

Gli elementi di primo ordine del sistema sono rappresentati dalla litosfera adriatica in subduzione e dal cuneo astenosferico sotto la fascia costiera toscano-laziale. Una geometria del tipo di quella proposta in fig. 1 consentirebbe di dare ragionevoli risposte ai primi quattro punti di domanda posti in precedenza. In particolare:

- il fronte della compressione appenninica sarebbe direttamente connesso, attraverso il *sole-thrust* dalla catena, al cuneo astenosferico il quale eserciterebbe la necessaria pressione per il distacco delle coltri dalla litosfera adriatica in subduzione e per il loro trasporto verso oriente. In sostanza, se idealizzassimo l'Appennino come un "megaduplex", il fronte del cuneo astenosferico rappresenterebbe il *leading edge* del sistema;
- le faglie legate alla distensione tirrenica non emergerebbero nella fascia dei "Graben" plio-pleistocenici bensì alle spalle del cuneo astenosferico, vale a dire decine di chilometri ad occidente delle depressioni appenniniche più esterne;
- la fascia dei "Graben" occuperebbe la vasta sinforme posta tra il cuneo astenosferico e il fronte della catena. I rigetti delle faglie che bordano le singole depressioni sarebbero interamente compensati all'interno della pila di coltri sovrastante il *sole thrust*. Queste faglie, per lo più faglie dirette, possono immergere indifferente verso il Tirreno o verso l'Adriatico, ciò in relazione alla configurazione geometrica del sistema di *thrust* attivo e, conseguentemente, all'accomodamento delle unità di tetto passivamente trasportate;
- il vulcanismo non resterebbe arretrato rispetto alla migrazione verso oriente delle strutture tirreniche ma marcherebbe esso stesso il fronte della distensione.

Nello schema proposto il cuneo astenosferico e, alla sue spalle, il bacino retroarco migrano nel tempo e nello spazio da ovest e sud-ovest ad est e nord-est seguendo l'arretramento flessurale della litosfera adriatica. In questa migrazione zone esterne al cuneo affette da deformazioni distensive (es. bacini messiniani della Toscana meridionale che in questo quadro rappresenterebbero depressioni intramontane e non zone di *rift* retroarco come comunemente assunto) potrebbero essere rideformate in regime compressivo vuoi per mutate condizioni di accomodamento geometrico, vuoi per propagazione di *thrusts* fuori sequenza vuoi, infine, per sviluppo di *back-thrusts* enucleati da una zona a triangolo in corrispondenza del *leading*

edge astenosferico. Questi meccanismi potrebbero rispondere, almeno in parte (v. altre variabili in Patacca *et al.* 1990, pp. 435-436), al punto di domanda 5.

A conclusione di quanto esposto desideriamo sottolineare ancora una volta che lo schema proposto rappresenta l'esplicitazione di un'ipotesi di lavoro che necessita numerose verifiche soprattutto di carattere geofisico. Ci è sembrato tuttavia opportuno sottoporre fin d'ora le nostre riflessioni all'attenzione e alla critica dei ricercatori interessati per le non trascurabili implicazioni che deriverebbero dall'abbandonare un postulato ("Graben" intraappenninici = emergenza delle faglie distensive tirreniche) che è tra i più radicati nella letteratura geologica corrente. Una delle prime conseguenze sarebbe la necessità di ridefinire dal punto di vista geometrico, cinematico e dinamico le più importanti strutture sismogenetiche dell'Arco Appenninico Settentrionale.

Bibliografia

- Amato A., Cimini G.B., Alessandrini B., 1991: *Struttura del sistema litosfera-astenosfera nell'Appennino Settentrionale da dati di tomografia sismica*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 83-90.
- Amato A., Selvaggi G., 1991: *Terremoti crostali e sub-crostaali nell'Appennino settentrionale*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 75-82.
- Anderson H., Jackson J., 1987: *The deep seismicity of the Tyrrhenian Sea*, Geophys.J.r.astron.Soc., vol. 91, 613-637.
- Babuska V., Plomerova J., 1990: *Tomographic studies of the upper mantle beneath Italian region*, Terra Nova, vol. 2, 569-576.
- Barberi F., Innocenti F., Ricci C.A., 1971: *Il magmatismo nell'Appennino centro-settentrionale*, In: "La Toscana Meridionale", Rend.Soc.ital. Mineral.Petrol., vol. 27, fasc.spec., 160-210.
- Bartole R., Torelli L., Mattei G., Peis D., Brancolini G., 1991: *Assetto stratigrafico-strutturale del Tirreno Settentrionale: stato dell'arte*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 115- 140.
- Beccaluva L., Brotzu L., Macciotta G., Morbidelli R., Serri G., Traversa G., 1989: *Cainozoic tectonic magmatic evolution and inferred mantle source in the Sardo-Tirrenian Area*, In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B.

- Piccardo, G.B Vai (Eds.), "The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research". It.Nat.Comm.Int.Lith.Progr., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv.Lincei, vol. 80, 229-248.
- Beccaluva L., Di Girolamo P., Serri G., 1984: *High-K calcalkalic shoshonitic and leucitic volcanism of Campania (Roman province, Southern Italy): trace elements constraints on the genesis of an orogenic volcanism in a post-collisional extensional setting*, Ed. Tipografia C. Corsi - Pisa, 47 pp.
- Beccaluva L., Di Girolamo P., Serri G., 1991: *Petrogenesis and tectonic setting of the Roman volcanic Province, Italy*, Lithos, vol. 26, 191-221.
- Biju-Duval B., Montadert L., 1977: *Introduction to the structural history of the Mediterranean basins*, In: B. Biju-Duval, L. Montadert (Eds.), "The structural history of the Mediterranean basins", Editions Technip, Paris, 1-12.
- Boccaletti M., Cerrina Feroni A., Mannori M.R., Martinelli P., Sani F., 1987: *La deformazione fragile, mesoscopica, dei depositi pleistocenici della bassa val di Cecina, in Toscana*, In: M. Boccaletti, G. Papani (Eds.), "Brittle deformation analysis in neotectonics", Ateneo parm.(Acta nat.), vol. 23, 253-264.
- Boccaletti M., Cerrina Feroni A., Martinelli P., Moratti G., Plesi G., Sani F., 1991: *L'alternanza distensione-compressione nel quadro evolutivo dei bacini neogenici dell'Appennino Settentrionale*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 187-192.
- Boccaletti M., Ciaranfi N., Cosentino D., Deiana G., Gelati R., Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi F., Tortorici L., 1990: *Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Tyrrhenian area during the Neogene*, Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., vol. 77, 41-50.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G., Postpischl D., 1985: *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*, Tectonophysics, vol. 117, 7-38.
- Boccaletti M., Dainelli P., 1982: *Il sistema regmatico neogenico-quaternario nell'area mediterranea: esempio di deformazione plastico-rigida post-collisionale*, Mem.Soc.geol.ital., vol. 24, 465-482.

- Boccaletti M., Guazzone G., 1972: *Gli archi appenninici, il mar Ligure ed il Tirreno nel quadro della tettonica dei bacini marginali retro-arco*, Mem.Soc.geol.ital., vol. 11, 201-216.
- Boccaletti M., Guazzone G., 1974: *Remnant arcs and marginal basins in the Cenozoic development of the Mediterranean*, Nature, vol. 252, 54-78.
- Boccaletti M., Nicolich R., Tortorici L., 1984: *The Calabrian Arc and the Ionian Sea in the dynamic evolution of the Central Mediterranean*, Marine Geol., vol. 55, 219-245.
- Calcagnile G., Panza G.F., 1981: *The main characteristics of the lithosphere-asthenosphere system in Italy and surrounding regions*, Pure and Appl. Geophys., vol.119, 865-879.
- Carmignani L., Kligfield R., 1990: *Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*, Tectonics, vol. 9, 1275-1303.
- Cerrina Feroni A., Martinelli P., Perilli N., 1989: *La fase tettonica del Pliocene inferiore nel settore nord orientale delle Colline Livornesi in Toscana*, Atti Soc.Tosc.Sci.Nat.Mem., s. A, vol. 96, 59-80.
- Cerrina Feroni A., Moratti G., Plesi G., 1983: *Evidenze di episodi compressivi messiniano-pliocenici alternati alla tettonica di distensione nella Toscana sud occidentale, emerse dall'analisi mesostrutturale*, Atti della riunione su "Meccanismi deformativi nelle catene perimediteranee: stato di avanzamento delle ricerche e problematiche emerse", (Firenze, 5 dic. 1983), Centro Stampa Palagi - Firenze, 35-42.
- Cinque A., Patacca E., Scandone P., Tozzi M., 1993: *Quaternary kinematic evolution of the Southern Apennines. Relationships between surface geological features and deep lithospheric structures*, Ann.Geofis., vol.36, 249-260.
- Civetta L., Francalanci L., Manetti P., Peccerillo A., Poli G., 1989: *Petrological and geochemical variations across the Roman Comagmatic Province: inference of magma genesis and crustle mantle evolution*, In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo, G.B Vai (Eds.), "The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research". It.Nat.Comm.Int.Lith. Progr., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv.Lincei, vol.80, 249-269.
- Civetta L., Orsi G., Scandone P., Pece R., 1978: *Eastwards migration of the Tuscan anatectic magmatism due to anticlockwise rotation of the Apennines*, Nature, vol.276, 604-606.
- CNR-P.F.Geodinamica, 1990: *Structural Model of Italy 1:500.000 and Gravity Map*, Quad.Ric.Sci., vol.3, n.114, S.EL.CA., Firenze.

- Della Vedova B., Marson I., Panza G.F., Suhadolc P., 1991: *Upper mantle properties of the Tuscan-Tyrrhenian area: a framework for its recent tectonic evolution*, Tectonophysics, vol. 195, 311-318.
- Dewey J.F., Helman M.L., Turco E., Hutton D.H.W., Knott S.D., 1989: *Kinematics of the Western Mediterranean*, In: M.P. Coward, D. Dietrich, R.G. Park (Eds.), "Alpine Tectonics", Geol.Soc. Spec. Publ. 45, 265-283.
- Di Girolamo P., 1978: *Geotectonic setting of Miocene-Quaternary volcanism in and around the eastern Tyrrhenian Sea border (Italy) as deduced from major elements geochemistry*, Bull. Volcanol., vol. 41, 1-22.
- Doglioni C., 1991: *A proposal of kinematic modelling for W-dipping subductions - Possible applications to the Tyrrhenian-Apennine system*, Terra Nova, vol. 3, 423-434.
- Doglioni C., Moretti I., Roure F., 1991: *Basal lithospheric detachment, eastward mantle flow and Mediterranean geodynamics: A discussion*, J.Geodyn., vol. 13, 47-65.
- Elter P., Giglia G., Tongiorgi M., Trevisan L., 1975: *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to Present) evolution of the Northern Apennines*, Boll.Geofis.teor.appl., vol. 65, 3-18.
- Finetti I., Del Ben A., 1986: *Geophysical study of the Tyrrhenian opening*, Boll.Geofis.teor.appl., vol. 28, 75-155.
- Gasparini C., Iannaccone G., Scandone P., Scarpa R., 1982: *Seismotectonics of the Calabrian Arc*, Tectonophysics, vol. 84, 267- 286.
- Giardini D., Velonà M., 1991: *The deep seismicity of the Tyrrhenian Sea*, Terra Nova, vol. 3, 57-64.
- Hsü K.J., 1977: *Tectonic evolution of the Mediterranean basins*, In: A.E.M. Nairn, W.H. Kaner, F.G. Stehli (Eds.), "The Ocean Basins and Margins", Plenum Press, New York, 29-75.
- Innocenti F., Serri G., Ferrara G., Manetti P., Tonarini S., 1992: *Genesis and classification of the rocks of the Tuscan Magmatic Province: thirty years after Marinelli's model*, Acta Vulcanol., vol. 2, 247-265.
- Kastens K.A., Mascle J., Aurox C., *et al.*, 1987: Proc. Init.Repts. (Pt. A), ODP, vol.107.
- Kastens K.A., Mascle J., Aurox C.A., Bonatti E., Broglia C., Channell J., Curzi P., Emeis K.C., Glaçon G., Hasegawa S., Hieke W., Mascle G., Mc Coy F., Mc Kenzie J., Mendelson J., Müller C., Rehault J.P., Robertson A., Sartori R., Sprovieri R., Torii M., 1988: *ODP Leg 107 in the Tyrrhenian Sea: insights into passive margin and back-arc basin evolution*, Bull.geol.Soc.Amer., vol. 100, 1140-1156.

- Kastens K.A., Mascle J., *et al.* 1990: Proc. ODP, Sci. Results, vol. 107, College Station TX (Ocean Drilling Program).
- Lavecchia G., 1988: *The Tyrrhenian-Apennines system: structural setting and seismotectonogenesis*, Tectonophysics, vol. 147, 263-296.
- Lavecchia G., Stoppa F., 1990: *The Tyrrhenian zone: a case of lithospheric extension control of intra-continental magmatism*, Earth Planet.Sci.Lett., vol. 99, 336-350.
- Lavecchia G., Stoppa F., 1991: *Distribuzione regionale dei litotipi ignei, traccianti geochimici e altri aspetti caratteristici dell'area tirrenica e peri-tirrenica, sua evoluzione tettonica e verifica del modello estensionale*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 413-428.
- Locardi E., 1982: *Individuazione di strutture sismogenetiche dall'esame della evoluzione vulcano-tettonica dell'Appennino e del Tirreno*, Mem.Soc.geol.ital., vol. 24, 569-596.
- Locardi E., 1985: *Neogene and Quaternary Mediterranean volcanism: the Tyrrhenian example*, In: D.J. Stanley, F.C. Wezel (Eds), "Geological Evolution of the Mediterranean Basin", Springer-Verlag, New York, 273-291.
- Locardi E., 1988: *The origin of the Apenninic arcs*, Tectonophysics, vol. 146, 105-123.
- Locardi E., Nicolich R., 1988: *Geodinamica del Tirreno e dell'Appennino centro-meridionale: la nuova carta della Moho*, Mem.Soc.geol.ital., vol. 41, 121-140.
- Malinverno A., Ryan W.B.F., 1986: *Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as a result of arc migration driven by sinking of the lithosphere*, Tectonics, vol. 5, 227-245.
- Mantovani E., 1982: *Some remarks on the driving forces in the evolution of the Tyrrhenian basin and Calabrian Arc*, In: E. Mantovani, R. Sartori (Eds.), "Structure, evolution and present dynamics of the Calabrian Arc", Earth Evolut.Sci., vol. 3, 266-270.
- Mantovani E., Albarello D., Babbucci D., Tamburelli C., 1992: *Recent geodynamic evolution of the Central Mediterranean region - Tortonian to Present*, Tipografia Senese, 88 pp.
- Mantovani E., Babbucci D., Albarello D., Mucciarelli M., 1990: *Deformation pattern in the Central Mediterranean and behaviour of the African/Adriatic Promontory*, Tectonophysics, vol. 179, 63-79.
- Martelli L., Moratti G., Sani F., 1989: *Analisi strutturale dei travertini della Toscana meridionale (Valle dell'Albegna)*, Boll.Soc.geol.ital., vol. 108, 197-205.

- Minelli G., Piali G., Scarascia S., 1991: *Revisione dei profili crostali nell'area dell'Appennino settentrionale interessata dal profilo CROP 03*, In: G. Piali, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 55- 64.
- Mongelli F., Zito G., 1991: *Flusso di calore nella regione Toscana*, In: G. Piali, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 91-98.
- Panza G.F., Calcagnile G., Scandone P., Mueller S., 1980: *La struttura profonda dell'area mediterranea*, Le Scienze, vol. 24, 60- 69.
- Patacca E., Sartori R., Scandone P., 1990: *Tyrrhenian basin and Apenninic arcs: kinematic relation since Late Tortonian times*, Mem.Soc.geol. ital., vol. 45, 425-451.
- Patacca E., Sartori R., Scandone P., 1993: *Tyrrhenian basin and Apennines. Kinematic evolution and related dynamic constraints*, In: E. Boschi, E. Mantovani, A. Morelli (Eds.), "Recent Evolution and Seismicity of the Mediterranean Region", Kluwer Academic Publ., 161-171.
- Patacca E., Scandone P., 1987: *Tectonic evolution of the outer margin of the Apennines and related foredeep system*, In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo, G.B Vai (Eds.), "The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research". Pre-print volume, 139-142.
- Patacca E., Scandone P., 1989: *Post-Tortonian mountain building in the Apennines. The role of the passive sinking of a relic lithospheric slab*, In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo, G.B Vai (Eds.), "The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research". It.Nat. Comm.Int.Lith.Progr., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv. Lincei, vol. 80, 157-176.
- Peccerillo A., 1985: *Roman Comagmatic Province (Central Italy): evidence for subduction-related magma genesis*, Geology, vol. 13, 103- 106.
- Peccerillo A., Conticelli S., Manetti P., 1990: *Petrological characteristics and genesis of recent magmatism of South Tuscany and North Latium*, Period.Mineral., vol. 56, 167-183.
- Pertusati P.C., Plesi G., Cerrina Feroni A., 1978: *Utilizzazione delle strutture stilolitiche per l'interpretazione di un'anticlinale post-messiniana nella Toscana meridionale*, Boll.Soc.geol.ital., vol. 97, 289-296.
- Pertusati P.C., Plesi G., Cerrina Feroni A., 1980: *Un episodio di raccorciamento interposto tra fasi di distensione nel calcare di Rosignano (neoautoctono) del bacino della Fine (Toscana meridionale)*, Boll.Soc.geol.ital., vol. 99, 175-181.

- Plesi G., Cerrina Feroni A., 1979: *Contributo alla conoscenza delle deformazioni del neoautoctono della Toscana: segnalazione di due fasi di raccorciamento attraverso lo studio degli stiloliti impressi sui ciottoli*, Boll.Soc.geol.ital., vol. 98, 15-25.
- Poli G., Manetti P., Tommasini S., 1991: *A petrological review on Miocene-Pliocene intrusive rocks from Southern Tuscany and Tyrrhenian Sea (Italy)*, Period.Mineral., vol. 58, 109-126.
- Rehault J.P., Moussat E., Fabbri A., 1987: *Structural evolution of the Tyrrhenian back-arc basin*, Marine Geol., vol. 74, 123-150.
- Sartori R., 1989: *Evoluzione neogenico-recente del bacino tirrenico e i suoi rapporti con la geologia delle aree circostanti*, G.Geol., s. 3, vol. 51, 1-30.
- Sartori R., 1990: *The main results of ODP Leg 107 in the frame of Neogene to Recent geology of Perityrrhenian areas*, In: K.A. Kastens, J. Mascle, et al. (Eds.), Proc. ODP, Sci. Results, vol. 107, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 715-730.
- Scandone P., 1979: *Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian Arc*, Boll.Soc.geol.ital., vol. 98, 27-34.
- Scarpa R., 1982: *Travel-time residuals and three-dimensional velocity structure of Italy*, Pure and Appl.Geophys., vol. 120, 583- 606.
- Selli R., 1985: *Tectonic evolution of the Tyrrhenian Sea*, In: D.J. Stanley, F.C. Wezel (Eds.), "Geological Evolution of the Mediterranean Basin", Raimondo Selli Commemorative Vol., Springer-Verlag - New York, 133-151.
- Selvaggi G., Amato A., 1992: *Subcrustal earthquakes in the northern Apennines (Italy): evidence for a still active subduction?*, Geophys. Res.Lett., vol. 19, 2127-2130.
- Serri G., 1990: *Neogene-Quaternary magmatism of the Tyrrhenian region: characterization of the magma sources and geodynamic implications*, Mem.Soc.geol.ital., vol. 41, 219-242.
- Serri G., Innocenti F., Manetti P., Tonarini S., Ferrara G., 1991: *Il magmatismo neogenico-quadernario dell'area tosco-laziale-umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale*, In: G. Pialli, M. Barchi, M. Menichetti (Eds.), "Studi preliminari sull'acquisizione dati del profilo CROP 03 Punta Ala-Gabicce", Stud. Geol.Camerti, Vol.Spec. 1991/1, 429-463.
- Suhadolc P., Panza G.F., 1989: *Physical properties of the lithosphere-asthenosphere system in Europe from geophysical data*, In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo, G.B. Vai (Eds.), "The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research". It.Nat.Comm.Int.Lith.

- Progr., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv.Lincei, vol. 80, 15-40.
- Tapponier P., 1977: *Evolution tectonique du système alpine en Méditerranée: poinçonnement et écrasement rigide-plastique*, Bull.Soc.géol.France, vol. 7, 437-460.
- Tomaselli A., Pastore S., Augliera B., Eva C., 1992: *Sismicità dell'Appennino nord-occidentale*, In: R: Capozzi, A. Castellarin (Eds.), "Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP 1-1A La Spezia - Alpi orientali", Stud.Geol.Camerti, Vol.Spec. 1992/2, 43-50.
- Van Bemmelen R.W., 1972: *Driving forces of Mediterranean orogeny. Test-case I: Tyrrhenian area*, Geol.en Mijnb., vol. 51, 548-573.
- Vigliotti L., Kent D.V., 1990: *Paleomagnetic results of Tertiary sediments from Corsica: evidence of post-Eocene rotation*, Phys.Earth Planet. Int., vol. 62, 97-108.
- Wezel F.C., 1985: *Structural features and basin tectonics of the Tyrrhenian Sea*, In: D.J. Stanley, F.C. Wezel (Eds.), "Geological evolution of the Mediterranean Basin", Springer Verlag, New York, 153-194.