

ALCUNI PROBLEMI DI MODELLISTICA GRAVIMETRICA DELLA MOHO NELL'APPENNINO SETTENTRIONALE

Riassunto

Abstract

1. Introduzione

2. Dati geologici e geofisici utilizzati

3. Modelli gravimetrici 3-D della Moho

4. Conclusioni

Riferimenti bibliografici

RIASSUNTO

Con i dati geologici e geofisici raccolti dalla letteratura si è realizzata una prima ricostruzione della Moho nell'Appennino Settentrionale. L'anomalia di Bouguer osservata è stata trattata con filtri nel dominio dei numeri d'onda per eliminare il contributo dei corpi più superficiali e sono stati analizzati criticamente i risultati. Il modello preliminare è stato modificato in modo che l'anomalia di Bouguer corrispondente, ricavata con programmi per il calcolo delle anomalie di corpi a forma tri-dimensionale, fosse in accordo con quella filtrata.

ABSTRACT

With the geological and geophysical data collected from the literature we obtained a first guess for the Moho in the Northern Apennines. The observed Bouguer's anomaly has been filtered in the wavenumber domain, in order to cancel out the contributions due to near surface bodies. We critically revised the results of the filtering procedure. Then we modified the preliminary model so that the corresponding Bouguer's anomaly, obtained by computer programs for the computation of the anomaly of 3-D bodies, fits the filtered one.

PAROLE CHIAVE: Moho, modellistica gravimetrica, anomalia di Bouguer, filtraggio.

KEYWORDS: Moho, gravimetric modelling, Bouguer's anomaly, filtering.

1. INTRODUZIONE

In questo lavoro viene studiata la possibilità di utilizzare i metodi per il calcolo delle anomalie di Bouguer di

corpi di forma complessa al fine di ricostruire l'andamento della discontinuità tra crosta e mantello. In particolare la zona che abbiamo analizzato è l'Appennino Settentrionale, nella regione compresa tra 42.5° e 44° di latitudine.

Alcuni modelli crostali di densità sono già stati proposti per questa zona. La maggior parte di questi modelli sono interpretazioni delle anomalie di Bouguer lungo profili e considerano quindi strutture cilindriche (MORELLI, *et al.*, 1977; CASSINIS, *et al.*, 1991). L'interpretazione lungo profili mediante strutture cilindriche presenta una serie di problemi, tra i quali ricordiamo i seguenti: (i) i profili non sono sempre perpendicolari alle strutture geologiche; (ii) si ha una scarsa possibilità di considerare la limitatezza delle strutture geologiche in direzione perpendicolare al profilo; (iii) l'anomalia di Bouguer viene considerata solo lungo il profilo, perdendo spesso di vista l'andamento regionale della stessa. Alcuni Autori presentano modelli tridimensionali di corpi di estensione limitata e relativamente superficiali (ORLANDO, *et al.*, 1991).

In questo lavoro vogliamo analizzare quali possono essere le indicazioni sull'andamento della Moho che si ottengono dal calcolo delle anomalie di Bouguer di corpi tridimensionali. Il pacchetto software utilizzato è IGAS, sviluppato presso la Freie Universität di Berlin (GÖTZE & LAHMEYER, 1988).

È noto che l'interpretazione gravimetrica non può fornire una interpretazione univoca, ma richiede l'introduzione di vincoli dedotti da studi geofisici complementari. Pertanto sono state raccolte alcune informazioni disponibili in letteratura sulle discontinuità crostali principali relative alla zona studiata. Con questi dati si è ricostruito un modello preliminare, che fornisce la base per le elaborazioni successive.

I valori di A_B (anomalia di Bouguer) osservati sono stati trattati con filtri nel dominio dei numeri d'onda per ricostruire l' A_B dovuta alle discontinuità crostali principali ed eliminare gli effetti dovuti ai corpi superficiali. Alcune ipotesi sull'andamento della discontinuità crosta-mantello sono state valutate calcolando le corrispondenti anomalie di Bouguer e verificandone la congruenza con la carta delle A_B filtrate.

2. DATI GEOLOGICI E GEOFISICI UTILIZZATI

Al fine di costruire un modello preliminare sono state prese in considerazione numerose sezioni geologiche e geofisiche per l'area in esame pubblicate negli anni passati (ALFANO, *et al.*, 1982; BARTOLE, *et al.*, 1991; BERTINI, *et al.*,

*Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra - Sezione di Geofisica - Via Cicognara 7 - 20129 Milano - Italia

**Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Scienze della Terra - Piazza Università - 06100 Perugia - Italia

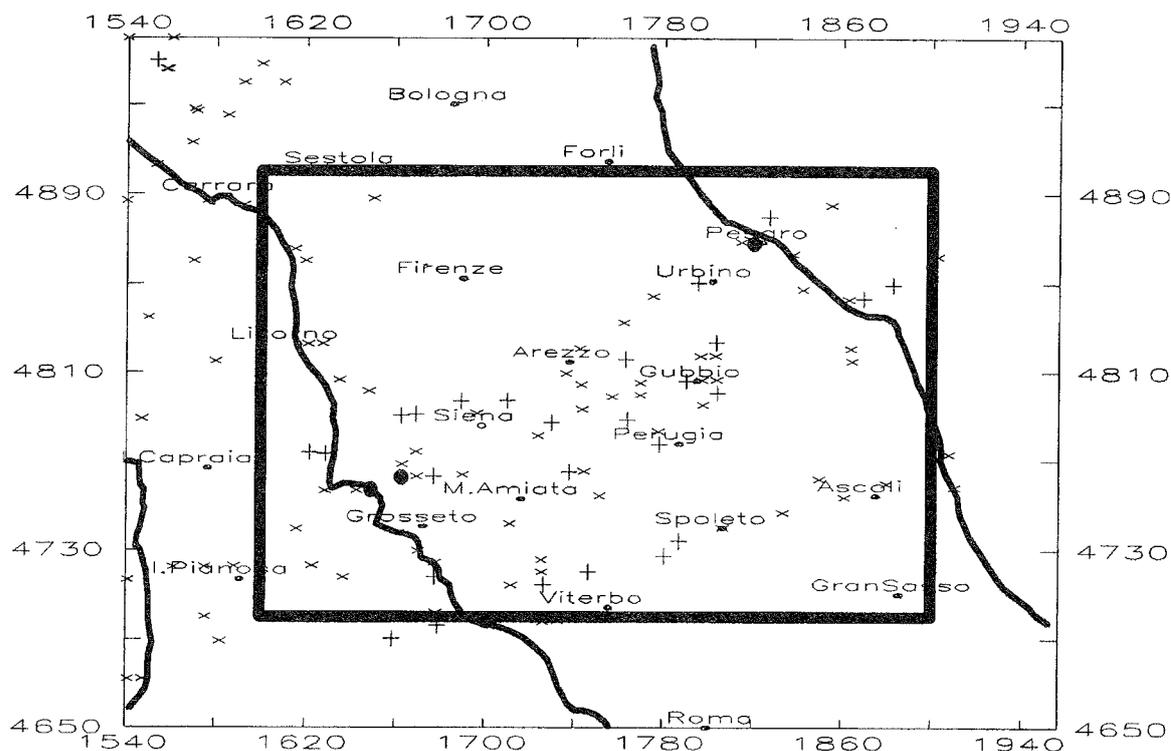


Fig. 1 - Carta dell'area in esame e disposizione dei punti usati per la definizione del modello preliminare. I simboli distinguono i punti di pertinenza delle diverse discontinuità: x Moho; + discontinuità superficiale; • entrambe le discontinuità. Il rettangolo più interno delimita l'area di indagine non influenzata dagli effetti del bordo.

1991; CASSINIS, *et al.*, 1979; CASSINIS & RANZONI, 1987; CASSINIS, *et al.*, 1991; GELMINI, 1991; MENICETTI, *et al.*, 1991; MORELLI, *et al.*, 1977). Da queste sezioni è stata ricavata la profondità della Moho e della discontinuità tra formazioni superficiali sedimentarie a bassa densità e le formazioni più profonde con densità più elevata. La figura 1 mostra la disposizione dei punti ricavati dalle sezioni e la delimitazione dell'area di indagine effettiva, che è rappresentata dal rettangolo più interno. I modelli presentati, nonché i valori di A_B , si riferiscono a tutta la regione indicata nella figura 1, ma solo i dati e i risultati relativi al rettangolo interno sono significativi, in quanto non risentono degli effetti di bordo discussi nel seguito.

La qualità dei dati a disposizione non permette una modellizzazione precisa delle formazioni superficiali e delle eventuali variazioni di densità all'interno del basamento e della crosta inferiore. In questo lavoro abbiamo considerato una struttura crostale molto semplice, costituita da uno strato superficiale con densità bassa, 2.6 g/cm^3 , uno strato inferiore, che comprende il basamento e tutta la crosta inferiore, con densità 2.78 g/cm^3 e infine il mantello con densità di 3.2 g/cm^3 .

Con i dati rappresentati in figura 1, abbiamo realizzato le carte preliminari dell'andamento della Moho (figura 2a) e della discontinuità tra formazioni superficiali a densità bassa e formazioni cristalline più profonde con densità maggiore (figura 2b). Mediante il programma SURFER4 è stata eseguita una interpolazione che ha permesso di riportare i dati su un reticolo regolare in modo da facilitare l'immissione dei dati nei programmi per il calcolo delle

A_B . Infatti il pacchetto IGAS richiede che il modello sia descritto mediante sezioni verticali parallele. Nel nostro caso abbiamo usato 11 sezioni verticali con orientamento E-W, ad una distanza di 28 km l'una dall'altra nella fascia tra 4650 e 4930 km. A queste sono state aggiunte due sezioni più esterne per limitare l'effetto ai bordi del modello.

Per quanto riguarda le anomalie di Bouguer osservate sono stati utilizzati i valori di A_B forniti dal Prof. Marson (Università di Trieste). Questi valori sono stati ottenuti dalla interpolazione di dati raccolti da diverse Università e Enti di ricerca.

Innanzitutto è stata verificata la congruenza tra questi dati e quelli riprodotti nelle carte di A_B del Servizio Geologico d'Italia (SGI, 1986) e del CNR (CNR, 1986) mediante sovrapposizione diretta delle carte di A_B . In effetti i valori di A_B a nostra disposizione sono stati ottenuti con una densità della piastra di Bouguer di 2.67 g/cm^3 , così come per la carta in scala 1:1000000 del Servizio Geologico d'Italia, mentre per la carta del CNR in scala 1:500000 è stata usata una densità della piastra di Bouguer di 2.4 g/cm^3 . Le differenze tra quest'ultima carta di A_B e quella ricavata dai dati in nostro possesso sono congruenti con questa diversità nei valori di densità della piastra di Bouguer: gli andamenti delle curve di livello di A_B sono molto simili, mentre i valori di A_B sono diversi soprattutto nelle zone più elevate e risultano pressoché identici in prossimità delle coste, dove la correzione di Bouguer si annulla. La figura 3 mostra le curve di livello di A_B ottenute coi dati a nostra

disposizione per la regione studiata. In particolare i dati sono distribuiti su un reticolo regolare di 32x32 nodi e spaziatura tra i nodi vicini di 10 km in direzione N-S e 13 km in direzione E-W.

Per separare il contributo dei corpi più superficiali da quello dovuto alle discontinuità crostali più profonde abbiamo utilizzato filtri nei numeri d'onda circolari ideali passa basso (OPPENHEIM & SCHAFFER, 1989), eliminando le componenti con lunghezze d'onda superiori a 80 km. I risultati di questo filtraggio sono presentati in figura 4 e mostrano gli effetti delle strutture profonde. Notiamo in particolare il forte gradiente di A_B presente lungo l'asse

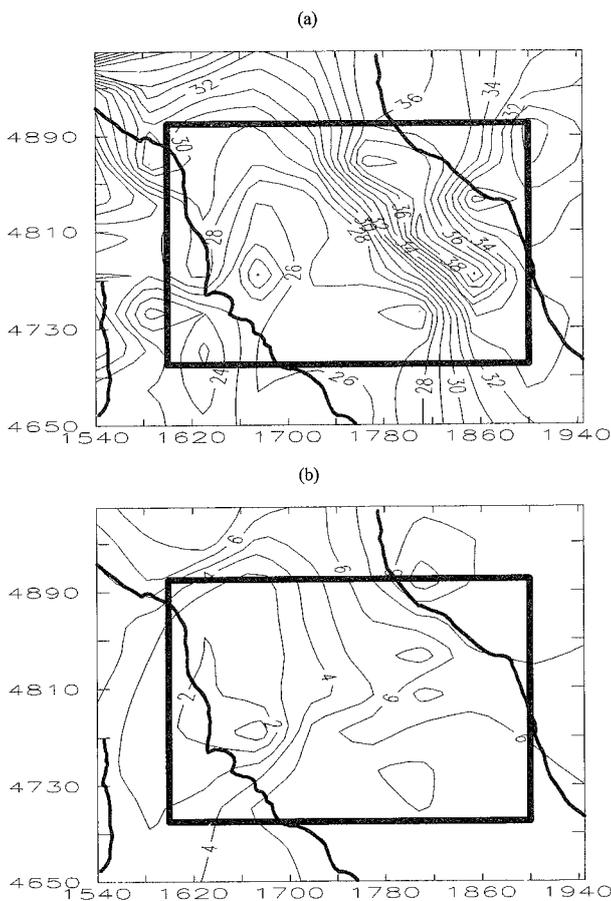


Fig. 2 - Modello preliminare: (a) profondità della Moho; (b) profondità della discontinuità tra formazioni superficiali a bassa densità e formazioni crostali più profonde a densità maggiore (equidistanza 1 km).

Appenninico, che corrisponde a una forte variazione nel livello della Moho nella stessa zona. Alcune piccole anomalie ancora osservabili nella zona toscana sono comunemente attribuibili a corpi "superficiali" (Graben di Siena-Radicofani, Monte Amiata, ecc.) e potrebbero essere eliminate con un filtraggio più spinto. Il minimo di A_B lungo la fascia adriatica risulta chiaramente interrotto nei pressi di Gubbio.

I risultati del filtraggio nelle zone vicine al bordo della mappa non sono attendibili, perché risultano influenzati da

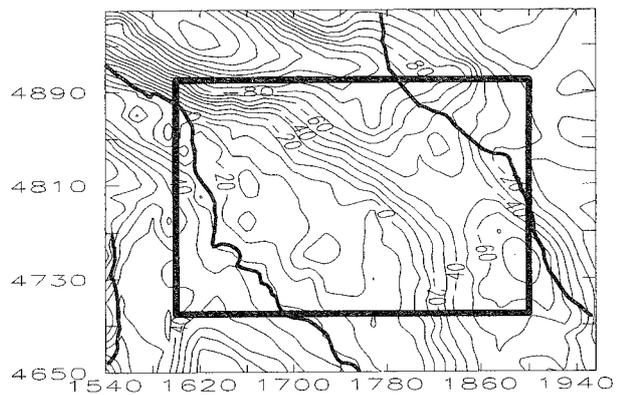


Fig. 3 - Curve di A_B ottenute coi dati a nostra disposizione (equidistanza 10 mgal).

artifici numerici. Pertanto anche nella figura 4 viene delimitata la zona più interna nella quale il risultato del filtraggio è considerato significativo.

Occorre inoltre ricordare che un filtro passa basso può separare correttamente le anomalie dovute alle diverse sorgenti se le loro bande spettrali non risultano sovrapposte. In generale questo non si verifica (BERNABINI, *et al.*, 1993). Ad esempio lo spettro di ampiezza dell'anomalia di una sfera posta a profondità z e con massa anomala M_a in funzione del modulo del numero d'onda, k , è dato da $P(k)=2\pi GM_a e^{-kz}$. Questa funzione ha il massimo per piccoli numeri d'onda, $P(k)=2\pi GM_a e^{-kz}$, e diminuisce esponenzialmente all'aumentare di k . Gli spettri relativi a sfere con diversa profondità sono differenti tra di loro solo per il coefficiente che appare nell'esponenziale, che determina la rapidità con cui lo spettro diminuisce all'aumentare di k .

Per ovviare a questo problema alcuni Autori hanno proposto l'utilizzo dei filtri di Wiener (GUPTA & RAMANI, 1980; PAWLOWSKI & HANSEN, 1990), che richiedono una stima a-priori del segnale che si vuole ricostruire. Poiché disponiamo di un modello preliminare ricavato dai dati di letteratura, abbiamo provato ad applicare un filtro di Wiener usando come stima a-priori proprio l' A_B calcolata

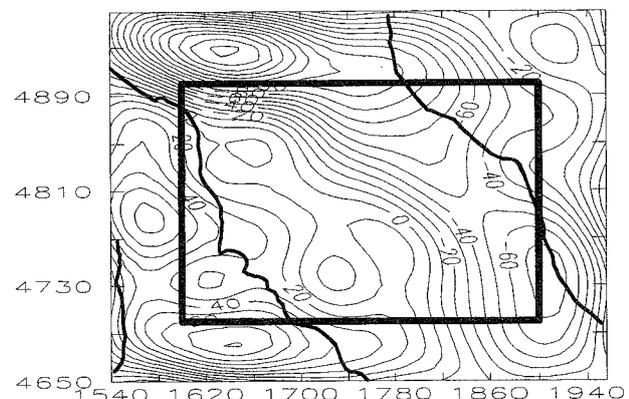


Fig. 4 - Curve di A_B dopo l'applicazione di un filtro passa basso (equidistanza 10 mgal).

per il modello preliminare, con i contrasti di densità citati in precedenza. Questo non si è rivelato molto utile, soprattutto perché il modello preliminare dà una A_B che non approssima in modo sufficientemente corretto l' A_B osservata.

Si è pertanto deciso di utilizzare come carta delle A_B da confrontare con i risultati dei modelli quella di figura 4, tenendo però sempre presenti i limiti enunciati qui sopra.

3. MODELLI GRAVIMETRICI 3-D DELLA MOHO

Sono stati ipotizzati diversi modelli per l'andamento della Moho e della discontinuità tra formazioni superficiali a bassa densità e basamento e crosta inferiore. Innanzitutto abbiamo realizzato due modelli estremi: nel primo è stata eliminata la discontinuità più superficiale ed è stato modificato l'andamento della Moho; nel secondo è stata tenuta invariata la Moho del modello preliminare ed è stata modificata la discontinuità più superficiale. Per riprodurre le A_B di figura 4 si è dovuto ricorrere a forti modifiche in entrambi i casi, al punto di introdurre andamenti delle due discontinuità di nessun significato geologico e geofisico. Questo ha messo in evidenza due fatti importanti.

(1) La discontinuità più superficiale rappresenterebbe una superficie di discontinuità reale tra le formazioni sedimentarie meno dense e quelle del basamento e della crosta inferiore con densità maggiore. In letteratura non si ritrovano dati sufficientemente accurati e numerosi per introdurre vincoli stringenti e ben fondati per questa discontinuità. Si è comunque deciso di mantenere nel modello questa discontinuità perché ci consente di limitare alcuni effetti dovuti ai corpi superficiali che non sono completamente e correttamente eliminati dal filtraggio. Questa superficie deve quindi essere considerata in parte come un artificio modellistico e la sua profondità non ha un particolare significato geologico-geofisico.

(2) Il modello preliminare della Moho non riproduce in modo soddisfacente le A_B osservate e necessita senza dubbio alcune variazioni. Ciò è anche dovuto al fatto che nella sua definizione si è operata una interpolazione tra

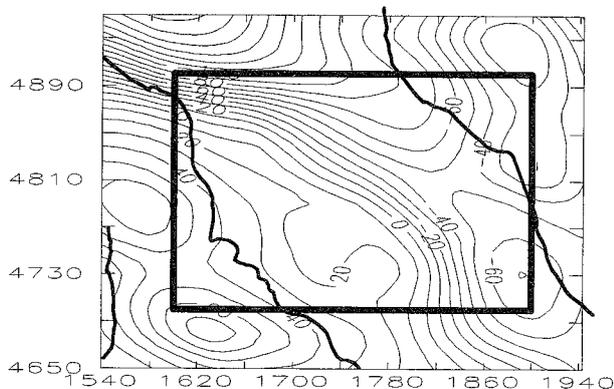


Fig. 5 - Curve di A_B calcolate con il modello di figura 6 (equidistanza 10 mgal).

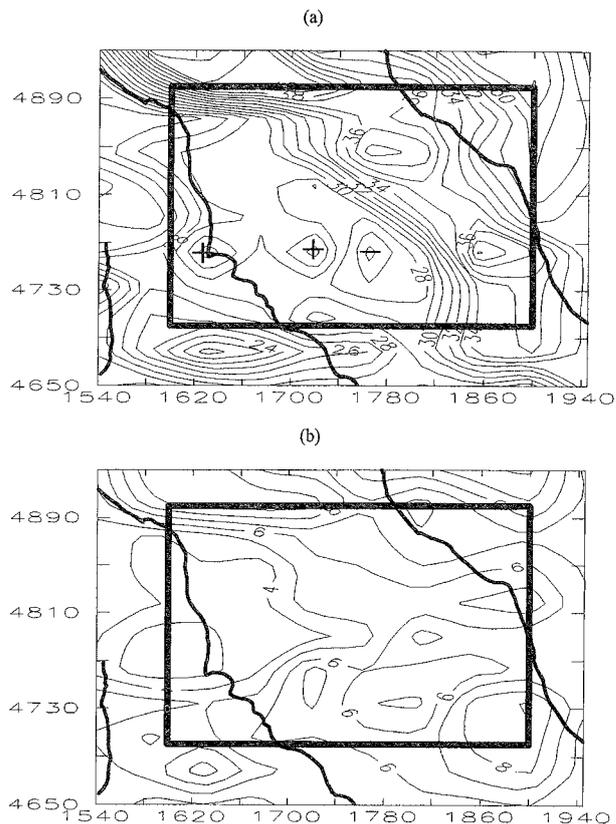


Fig. 6 - Modello finale: (a) profondità della Moho; (b) profondità della discontinuità tra formazioni superficiali a bassa densità e formazioni crostali più profonde a densità maggiore (equidistanza 1 km).

risultati dovuti a diversi Autori e talora corrispondenti anche a ipotesi distinte.

Modificando entrambe le discontinuità del nostro modello, sempre mantenendoci il più possibile vincolati al modello preliminare, abbiamo ricostruito un andamento delle stesse che riproduce con un buon accordo le A_B osservate. La figura 5 mostra appunto le curve di livello di A_B calcolate per il modello rappresentato nella figura 6.

4. CONCLUSIONI

Questo lavoro ha messo in evidenza alcuni risultati interessanti riguardanti la modellistica gravimetrica della Moho su un'area estesa.

Innanzitutto si è visto come i filtri nel dominio dei numeri d'onda consentano di trarre utili indicazioni per la separazione dei contributi all'anomalia di Bouguer dei corpi posti a diverse profondità. Si è anche osservato che questi risultati vanno comunque considerati con particolare attenzione, per una serie di effetti dovuti sia a problemi di carattere numerico, legati essenzialmente alla limitatezza del dominio su cui sono noti i dati, sia di carattere fisico, poiché le bande spettrali delle anomalie di corpi a diverse profondità risultano in effetti sovrapposte.

L'andamento della discontinuità crosta-mantello di figura 6a risulta uno dei modelli di densità compatibili con le misure di gravità e mette in evidenza alcune caratteristiche importanti. (i) La variazione della profondità della Moho attraverso l'asse appenninico è molto accentuata nell'Appennino Tosco-Emiliano, mentre è più limitata in Umbria e Toscana, dove si ha un approfondimento di circa 5 km su distanze dell'ordine di 25-30 km. (ii) Sul versante tirrenico la Moho si trova ad una profondità quasi costante di 29 km, con alcune ondulazioni nella zona più meridionale. Queste ondulazioni spiegano alcune anomalie presenti in quell'area, le quali potrebbero essere causate anche da corpi più superficiali. (iii) Sul versante adriatico si nota l'approfondimento della Moho fino a circa 39 km, che produce una fossa interrotta a Est di Gubbio.

Il lavoro proseguirà con la elaborazione di ulteriori modelli cristallini di densità, compatibili con le misure di A_B e corrispondenti a ipotesi geologiche diverse da quelle fin qui considerate.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata in parte finanziata con fondi MURST 60%. Si ringraziano i Prof. Piali e Cassinis per l'incoraggiamento e i consigli ricevuti nel corso del lavoro.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

ALFANO L., DECANDIA F.A., LAVECCHIA G., PIALI G.P., BIELLA G., LOZEI A. & SCARASCIA S. (1982) - *Profilo Piombino-Ancona: dati geofisici ed interpretazione geologica*. Boll. Soc. Geol. It., **101**, 247-258.

BARTOLE R., TORELLI L., MATTEI G., PEIS D. & BRANCOLINI G. (1991) - *Aspetto stratigrafico-strutturale del Tirreno Settentrionale: stato dell'arte*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 115-140.

BERNABINI M., FAINA M. & ORLANDO L. (1993) - *Confronto tra tecniche di elaborazione di dati gravimetrici*. Atti dell'11° Convegno, CNR-GNGTS, 761-768.

BERTINI G., CAMELI G.M., COSTANTINI A., DECANDIA F.A., DI FILIPPO M., DINI I., ELTER F.M., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., PANDELI E., SANDRELLI F. & TORO B. (1991) - *Struttura geologica tra i monti di Campiglia e Rapolano Terme (Toscana Meridionale): stato attuale delle conoscenze e problematiche*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 155-178.

CASSINIS R., FRANCIOSI R. & SCARASCIA S. (1979) - *The structure*

of the Earth crust in Italy. A preliminary typology based on seismic data. Boll. Geof. Teor. Appl., **21** (82), 105-126.

CASSINIS R. & RANZONI A. (1987) - *Contribution of controlled source seismology to the study of seismogenesis: examples from the Italian transitional area*. Tectonophysics, **140**, 81-91.

CASSINIS R., PIALI G.P., BROGGI M. & PROSPERI M. (1991) - *Dati gravimetrici a grande scala lungo la fascia del profilo: interrogativi sull'assetto della crosta e del mantello*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 41-48.

CNR (1986) - *Carta delle Anomalie di Bouguer (Scala 1:500000)*. Progetto Finalizzato Geodinamica, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

GELMINI R. (1991) - *Profilo geologico tra l'Argentario e M.te Cetona (Toscana meridionale)*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 179-186.

GÖTZE H.-J. & LAHMEYER B. (1988) - *Applications of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics*. Geophysics, **53**(8), 1096-1108.

GUPTA V.K. & RAMANI N. (1980) - *Some aspects of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian terrain*. Geophysics, **45**(9), 1412-1426.

MENICCHETTI M., DE FEJTER A.J. & CORSI M. (1991) - *CROP 03 - Il tratto Val Tiberina-Mare Adriatico. Sezione geologica e caratteristiche tettonico-sedimentarie delle avansfocce della zona umbro-marchigiano-romagnola*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 279-294.

MORELLI C., GIESE P., CAROZZO M.T., COLOMBI B., GUERRA I., HIRN A., LETZ H., NICOLICH R., PRODEHL C., REICHERT C., ROWER P., SAPIN M., SCARASCIA S. & WIGGER P. (1977) - *Crustal and upper mantle structure of the Northern Apennines, the Ligurian Sea and Corsica, derived from seismic and gravimetric data*. Bollettino di Geofisica, **75/76**, 199-260.

OPPENHEIM A.V. & SCHAFER R.W. (1989) - *Discrete-time signal processing*. 879 pp., Prentice Hall, Englewood Cliffs (New Jersey, USA).

ORLANDO L., BERNABINI M., BERTINI G., CAMELI G.M. & DINI I. (1991) - *Il bacino neogenico di Radicofani*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 199-206.

PAWLOWSKI R.S. & HANSEN R.O. (1990) - *Gravity anomaly separation by Wiener filtering*. Geophysics, **55**(5), 539-548.

SGI (1986) - *Carta Gravimetrica d'Italia (Scala 1:1000000)*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

