

CORRELAZIONI TRA LE ANOMALIE TERMICHE ED ALTRI ELEMENTI GEOFISICI E STRUTTURALI DELLA TOSCANA MERIDIONALE

Riassunto

Abstract

1. Introduzione
 2. Carta dei gradienti geotermici
 3. Carta del flusso di calore
 4. Carta gravimetrica
 5. Altri dati
 6. Discussione
- Riferimenti bibliografici

RIASSUNTO

E' stata eseguita una revisione di tutti i dati termici disponibili nella Toscana meridionale che ha portato alla realizzazione di carte di gradiente e di flusso termico aggiornate. Le anomalie termiche così ricostruite sono state confrontate con i principali elementi geofisici e strutturali. Buone correlazioni si riscontrano a livello regionale tra lineamenti termici e motivi geologico-strutturali: in particolare, in corrispondenza dei campi geotermici di Larderello e del M. Amiata, le anomalie termiche positive corrispondono a minimi gravimetrici ed ai massimi sollevamenti dei sedimenti pliocenici. Ulteriori correlazioni con anomalie conduttive, evidenziate da recenti dati magnetotellurici, ed anomalie di velocità di propagazione delle onde sismiche "P", portano ad ipotizzare la presenza di estesi corpi intrusivi profondi, responsabili delle ampie anomalie termiche che caratterizzano le aree geotermiche.

ABSTRACT

A complete updating has been carried out on the geothermal gradient and heat flow maps, reviewing all available thermal data from Southern Tuscany. The resulting thermal anomalies have been compared with the main geophysical and structural features. Good regional correlations have been observed between thermal and geological-structural features: in the geothermal fields of Larderello and M. Amiata, in particular, there is a correlation between positive thermal anomalies, gravity minima and maximum uplift of the Pliocenic sediments. Further comparisons between MT conductive anomalies and anomalous seismic "P" wave velocities have led to hypothesize the presence of extensive deep-seated intrusive bodies, which are responsible for the widespread thermal anomalies characterizing these geothermal areas.

* ENEL S.p.A./V.D.T./G. - Via Andrea Pisano, 120 - 56100 Pisa

** Istituto Internazionale Ricerche Geotermiche CNR - Piazza Solferino, 2 - Pisa

PAROLE CHIAVE: geotermia, gradiente geotermico, flusso di calore, anomalia gravimetrica, intrusioni granitiche.

KEY WORDS: geothermics, geothermal gradient, heat flow, gravity anomaly, granitic intrusions.

1. INTRODUZIONE

In riferimento all'area della Toscana meridionale interessata dal profilo CROP 03 Punta Ala - Gabicce, sono state formulate alcune ipotesi circa l'evoluzione geodinamica e l'assetto strutturale profondo dell'area stessa, partendo dai risultati di una elaborazione della mappa del flusso di calore della fascia pre-appenninica disponibile a quella data (MONGELLI *et al.*, 1991). In vista dell'esecuzione del nuovo profilo CROP 18, che interessa i due campi geotermici principali (Larderello e M. Amiata) e le aree tra essi interposte, si è ritenuto opportuno di rivedere tutti i dati geotermici per la Toscana meridionale, confrontandoli con i principali dati strutturali e geofisici disponibili. Negli ultimi anni, infatti, l'Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, sulla base di contratti di ricerca ENEL-CNR, ha eseguito numerose misure di flusso di calore in pozzetti perforati ad hoc, nelle aree esterne ai campi geotermici in sfruttamento, al fine di definire meglio le anomalie già individuate e di scoprirne eventuali altre. Sono stati così raccolti e revisionati, in collaborazione tra il CNR-IIRG e l'ENEL-VDAG, tutti i dati di gradiente geotermico e di flusso di calore acquisiti dalla Larderello SpA, dall'ENEL e dal CNR-IIRG a partire dagli anni Sessanta attraverso misure in pozzi di profondità variabile da qualche decina a qualche centinaio di metri (BELLANI *et al.*, 1993). In particolare, sono stati utilizzati oltre 300 punti di misura (fig. 1); in corrispondenza dei campi geotermici sono stati utilizzati anche dati termometrici di pozzi profondi. Il lavoro, tenendo come base la cartografia già pubblicata sull'argomento (CALAMAI *et al.*, 1976; SQUARCI & TAFFI, 1984; MONGELLI *et al.*, 1987; Rapporto C.E.E., 1988), ha consentito di realizzare le carte dei gradienti geotermici e del flusso di calore della Toscana meridionale, aggiornate al 1993. Allo scopo di correlare le anomalie termiche con gli elementi strutturali, è stata realizzata una carta dell'anomalia gravimetrica di Bouguer aggiornata, per la cui costruzione sono state utilizzate circa 18000 stazioni gravimetriche distribuite su un'area di circa 12000 km², con una densità di rilievo

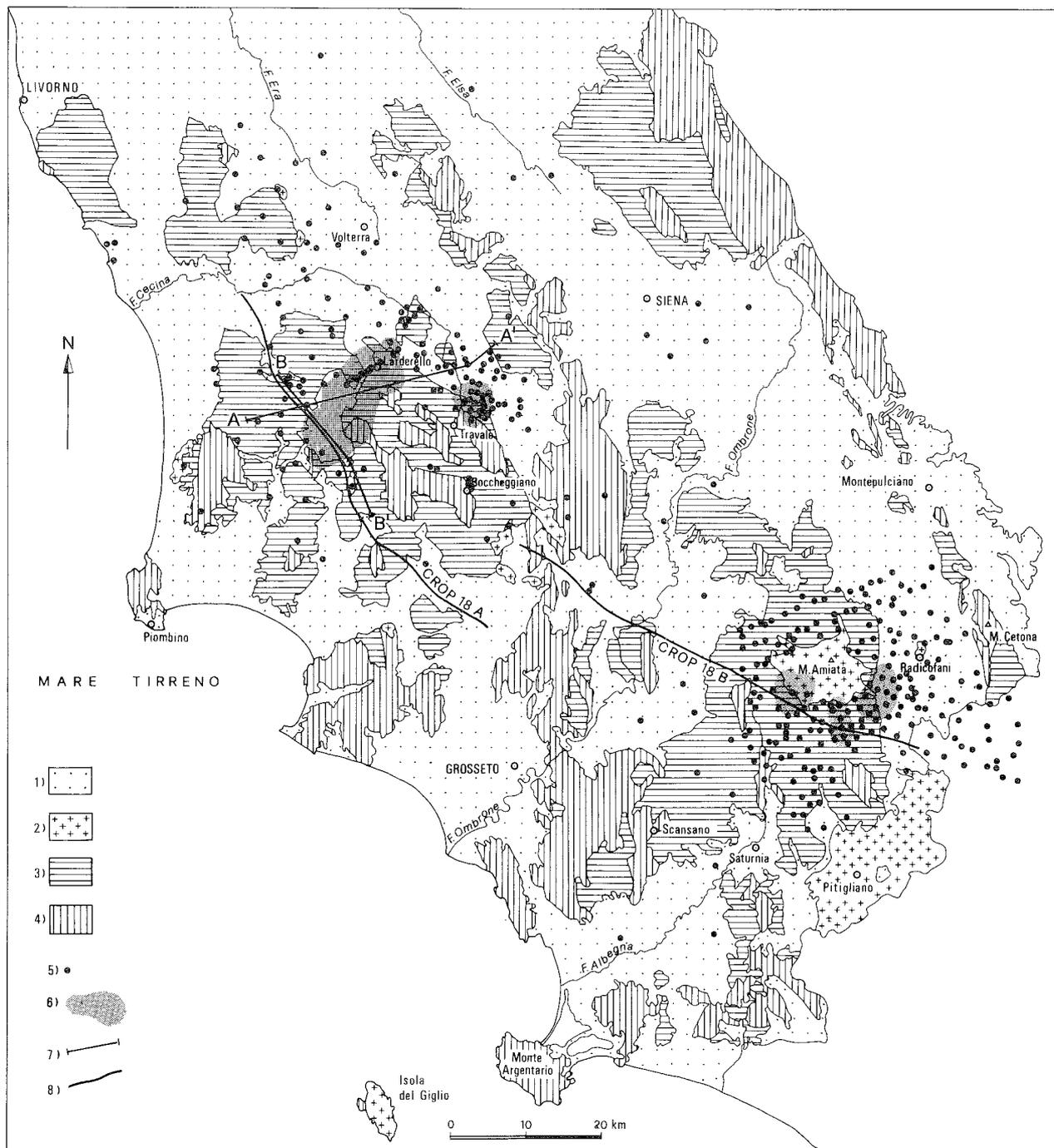


Fig.1 - Carta geologica schematica ed ubicazione dei pozzetti geotermici : 1) Terreni neogenici; 2) Rocce ignee Plio-quaternarie; 3) Complessi alloctoni: ofiolitifero, dei flysch Paleocenico-eocenici, dei flysch liguri Cretaceo-paleocenici e delle "argille e calcari"; 4) Complesso dei terreni di facies toscana e delle scaglie metamorfiche del promontorio dell'Argentario e dell'Isola del Giglio; 5) Pozzetti geotermici; 6) Campi geotermici; 7) Traccia sezioni geologiche; 8) Traccia profili CROP 18 A e B

molto accurata (1.5 staz./km²). Ulteriori correlazioni sono state verificate in corrispondenza dei campi geotermici tra le anomalie termiche ed altri elementi strutturali e geofisici, quali il sollevamento dei sedimenti pliocenici, l'inversione di velocità delle onde P da dati sismici, le anomalie di resistività da dati magnetotellurici.

2. CARTA DEI GRADIENTI GEOTERMICI

La carta dei gradienti geotermici (fig. 2) è stata realizzata con i dati raccolti in oltre 300 punti di misura, corrispondenti a pozzi la cui profondità varia tra i 30 ed i 150 m, salvo alcuni con profondità superiori; in quest'ulti-

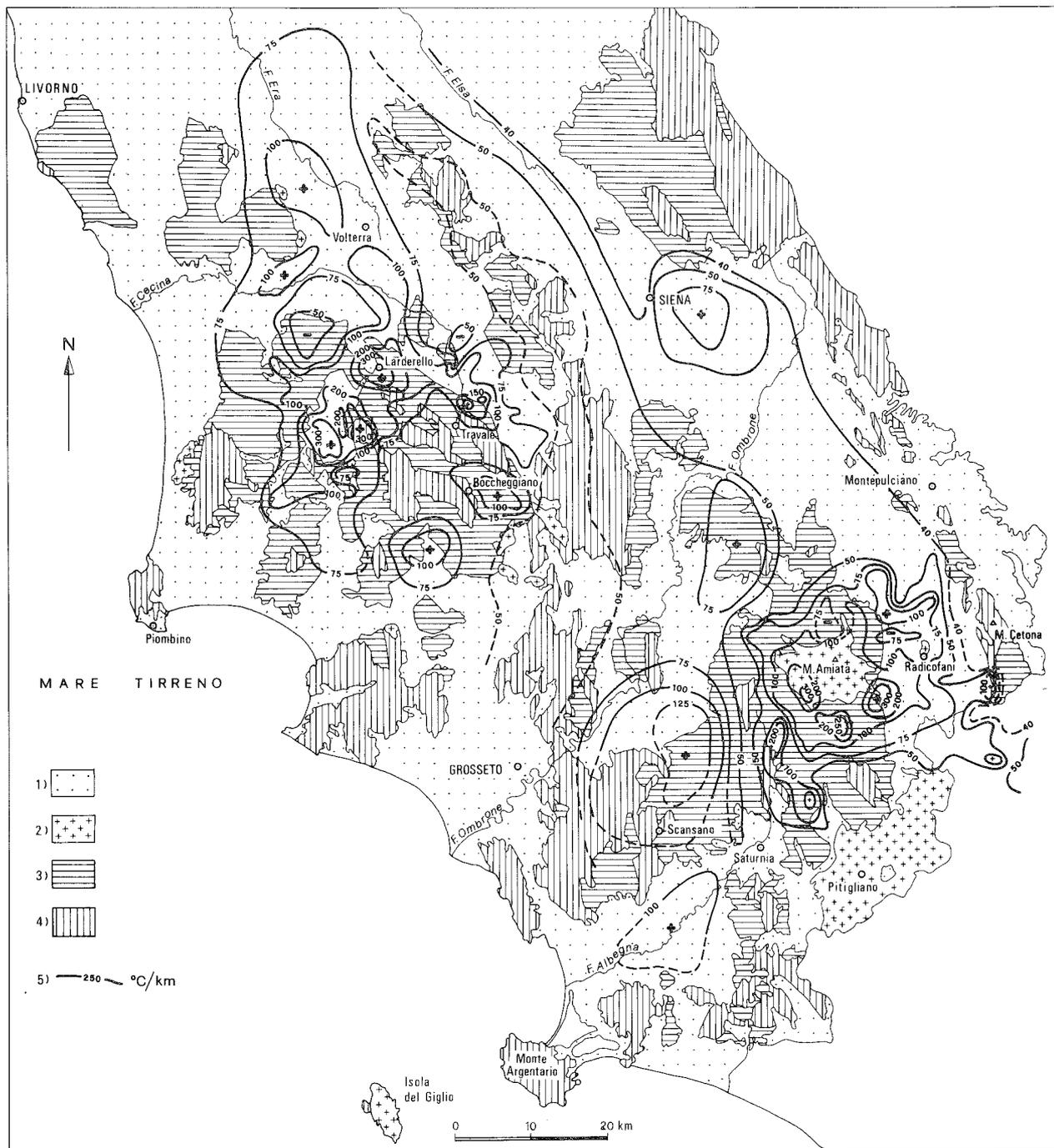


Fig.2 - Carta dei gradienti geotermici : 1),2),3),4): vedere fig. 1; 5) linea di isogradiante geotermico (°C/km).

mo caso si tratta in genere di pozzi perforati da altri Enti per altri scopi, e successivamente utilizzati per misure termometriche. La quasi totalità dei pozzi è ubicata in terreni scarsamente permeabili, dove la mancanza di circolazioni importanti o di movimenti convettivi, consente di misurare i gradienti geotermici in regime conduttivo. I pozzetti di profondità attorno ai 30/35 m appartengono alle prospezioni eseguite negli anni '60, e sono concentrati attorno alle zone in cui si è sviluppato lo sfruttamento della

risorsa geotermica. La limitata profondità di tali pozzi era conseguente alla filosofia di prospezione termica al tempo adottata, che prevedeva un elevato numero di pozzi di piccola profondità per meglio individuare disturbi superficiali molto localizzati. Comunque, il confronto con i dati termici ricavati dai pozzi di maggiore profondità eseguiti in zone ad essi limitrofe in tempi più recenti, ha permesso di verificare che i risultati di tali prospezioni sono sostanzialmente corretti. Questo, soprattutto quando la situazio-

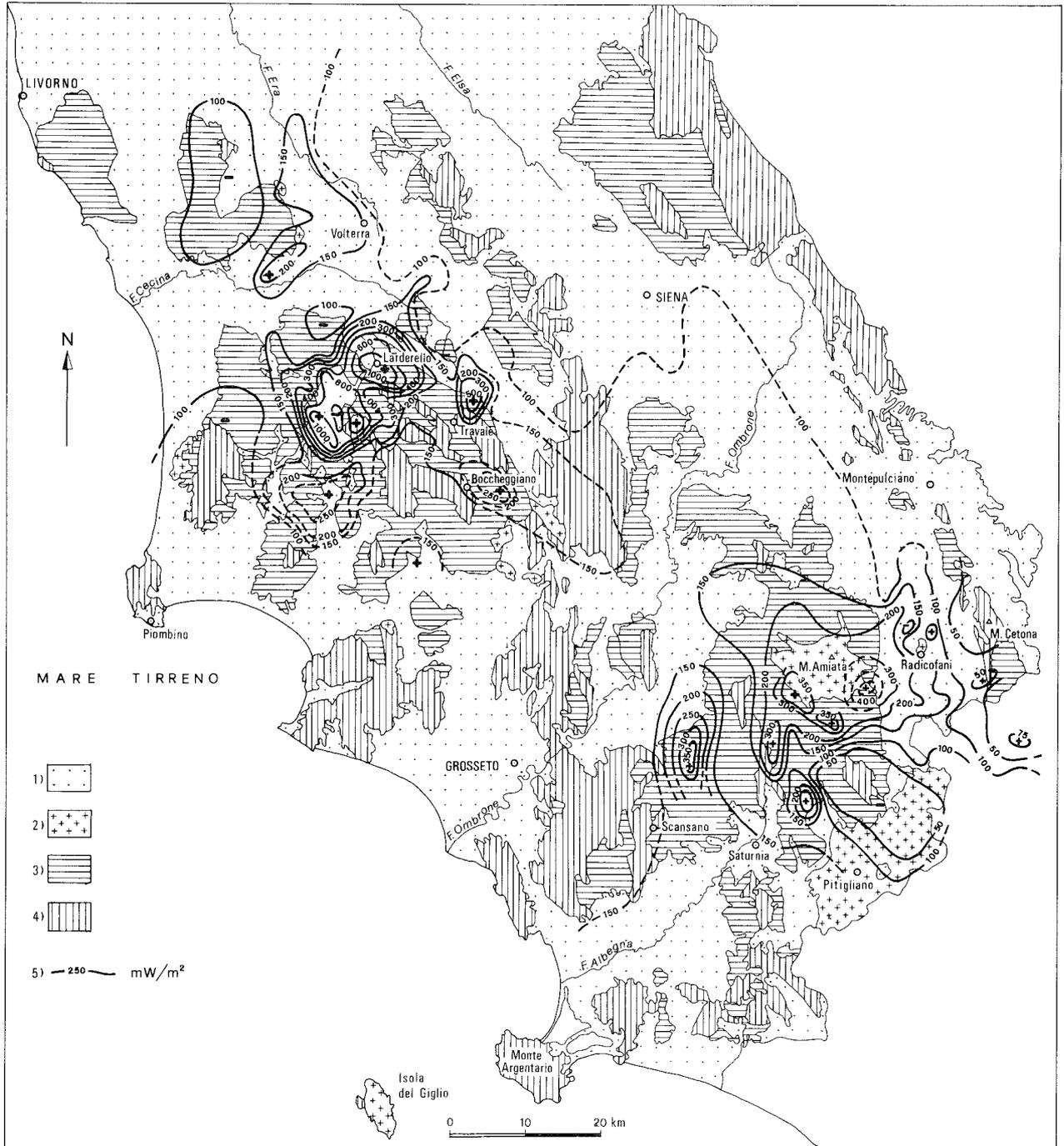


Fig.3 - Carta del flusso di calore : 1),2),3),4): vedere fig.1; 5) linea di isoflusso (mW/m^2).

ne morfologica ed idrogeologica dei siti (topografia con andamento dolce, litologia impermeabile) è tale da non avere influenza significativa sul gradiente geotermico superficiale. In corrispondenza dei campi geotermici in esercizio di Larderello, Travale e M. Amiata sono stati utilizzati anche dati termici raccolti in pozzi profondi che hanno consentito la stima del gradiente. La buona correlabilità tra i dati di gradiente rilevati è stata verificata anche tra metodologie di misura differenti: termometrie sistematiche con termocoppie posizionate a profondità

fisse fino a stabilizzazione, profili termici ripetuti nel tempo, termometrie in pozzi profondi con estrapolazione delle temperature misurate. E' opportuno rilevare che, nonostante la densità dei punti di misura non sia omogenea, essendo essi maggiormente concentrati in corrispondenza dei campi geotermici, il quadro regionale che se ne ricava si può considerare affidabile.

La carta evidenzia un'anomalia positiva a livello regionale, con valori $> 50 \text{ }^\circ\text{C/km}$. Da Nord-Ovest verso Sud-Est si incontra dapprima un'ampia zona sub-parallela alla

linea di costa in cui una isoterma di $75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ racchiude zone con gradienti superiori ai $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ centrate lungo il graben dell'Era ed il medio corso del fiume Cecina. Sempre all'interno dell'isoterma $75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ si osserva una zona di minimo relativo (con valori $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$) in corrispondenza degli affioramenti di terreni permeabili del Gruppo Ofiolitifero. Questa delimita il margine settentrionale dell'ampia zona dei campi geotermici di Larderello - Travale, dove si superano anche i $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. A Sud-Est dei campi, due altri massimi relativi dell'anomalia, con valori superiori ai $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (area di Boccheggiano), delimitano la zona fin qui descritta. Ad Est, l'anomalia decresce molto rapidamente fino ad incontrare una fascia stretta e lunga corrispondente principalmente ad aree di estesi affioramenti di terreni permeabili calcareo-dolomitici e terrigeni del basamento metamorfico toscano. Tale fascia è racchiusa tra due isoterme di $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, e borda tutta la zona di anomalia sopra descritta, estendendosi anche a Sud di essa. Un'altra zona a forte anomalia positiva (isoterma $> 75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$) è centrata sul M. Amiata, ed in particolare sul suo margine meridionale, dove si raggiungono valori dell'ordine dei $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ in corrispondenza dei campi geotermici (Piancastagnaio, Bagnore). A Sud-Ovest del M. Amiata, si incontra una stretta fascia di forte anomalia, che decresce bruscamente sul suo bordo occidentale. Qui, l'infiltrazione di acque fredde e la loro circolazione nel sottosuolo all'interno delle formazioni carbonatiche permeabili mesozoiche causano un abbassamento dei valori di gradiente fino ai $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Una ripresa del gradiente si incontra verso Ovest in un'ampia area attorno a Scansano, che raggiunge valori superiori ai $125\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Un'ultima anomalia con valori superiori ai $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ è stata individuata nel bacino dell'Albegna, a Sud-Ovest di Saturnia.

3. CARTA DEL FLUSSO DI CALORE

Alla disomogenea distribuzione dei punti di misura messa in evidenza precedentemente bisogna aggiungere che quelli utilizzati per la carta del flusso di calore (fig.3) sono in numero leggermente inferiore rispetto a quelli della carta dei gradienti, in quanto in alcune delle prospezioni più vecchie non erano stati raccolti campioni per le misure di conducibilità termica. A quel tempo, infatti, non era ancora stata sviluppata in Italia la tecnica della misura di conducibilità su carote. Esistevano peraltro, per le stesse prospezioni, misure di gradiente corretto in base alla resistività elettrica delle formazioni attraversate (MOUTON, 1969). La correzione del gradiente mediante questo parametro consente di ottenere un'indicazione di massima, ma attendibile, del flusso di calore. Si è potuto così tener conto, sia pur solo indicativamente, di questi dati. In altri casi, invece, si sono attribuiti per analogia valori di conducibilità termica ottenuti in sondaggi limetici in formazioni litologicamente affini. Occorre rilevare che la conducibilità termica può venire misurata in regime stazionario o transitorio. Nei metodi in regime stazionario

la conducibilità termica viene misurata direttamente, mentre nei metodi in regime transitorio vengono ottenuti valori di diffusività termica, e da questi si calcola la conducibilità termica. I metodi in regime stazionario richiedono lunghi periodi di tempo per raggiungere le condizioni di equilibrio, ma, per contro, la precisione delle misure è notevole. I metodi in regime transitorio sono molto più rapidi, ma i risultati sono affetti da una minore precisione. La misura in regime stazionario su un campione (carota) di roccia prelevato ortogonalmente alla superficie terrestre esprime direttamente un valore univoco di conducibilità termica verticale; se questa, invece, viene misurata in regime transitorio (mediante sonda ad ago di Von Herzen e Maxwell, o Shotherm QTM), richiede, per una sua corretta definizione, la combinazione di due valori misurati rispettivamente parallelamente alla stratificazione ed ortogonalmente ad essa (GRUBBE *et al.*, 1983). Prendendo in considerazione una sola delle due direzioni di misura, si commette un errore che è funzione dell'anisotropia della roccia rispetto alla trasmissione del calore. Nel nostro caso, la quasi totalità dei dati disponibili deriva da misure eseguite in regime transitorio, e nella maggior parte dei casi, purtroppo, solo nella direzione ortogonale alla stratificazione. E' stato quindi possibile redigere la carta utilizzando solo questo dato "parziale" di conducibilità termica. Dal confronto con le misure di conducibilità verticale effettuate nelle serie di sondaggi perforati più recentemente, e tenuto conto che generalmente si ha a che fare con rocce sedimentarie, con giacitura ed eventuale stratificazione a basso angolo, si è constatato come il fatto di prendere in considerazione una sola componente della conducibilità termica porta effettivamente ad una generale sovrastima del valore del flusso di calore. Tale sovrastima è comunque contenuta nell'ordine di pochi punti percentuali, ed essendo omogeneamente distribuita su tutti i valori considerati, non altera significativamente l'andamento delle anomalie del flusso riscontrate. All'interno dei campi geotermici, si sono ottenuti valori di flusso di calore utilizzando i gradienti rilevati in pozzi profondi e, in mancanza di misure di conducibilità su carote, assegnando alle varie formazioni incontrate valori di conducibilità misurati su litologie analoghe (MONGELLI *et al.*, 1982).

L'andamento tendenzialmente anomalo a livello regionale è evidenziato dalla linea isoflusso di $100\text{ mW}/\text{m}^2$, che delimita ad Est un'ampia parte della regione. Da Nord-Ovest verso Sud-Est incontriamo dapprima un minimo relativo ($< 100\text{ mW}/\text{m}^2$) in corrispondenza di un'ampia area sollevata in cui affiorano terreni del Complesso Ofiolitifero e sedimenti del Complesso Neoautoctono. Ad Est di essa un'anomalia di $150\text{ mW}/\text{m}^2$ si estende lungo il graben dell'Era ed il medio corso del fiume Cecina, dove si ha un massimo relativo superiore ai $200\text{ mW}/\text{m}^2$. Verso Sud è presente un piccolo minimo relativo che, come l'analogo minimo del gradiente corrisponde all'area degli affioramenti permeabili ofiolitiferi che borda a settentrione la zona del campo geotermico di Larderello. Questa è caratterizzata da una ampia e forte anomalia positiva che si prolunga con continuità verso Sud-Ovest, e

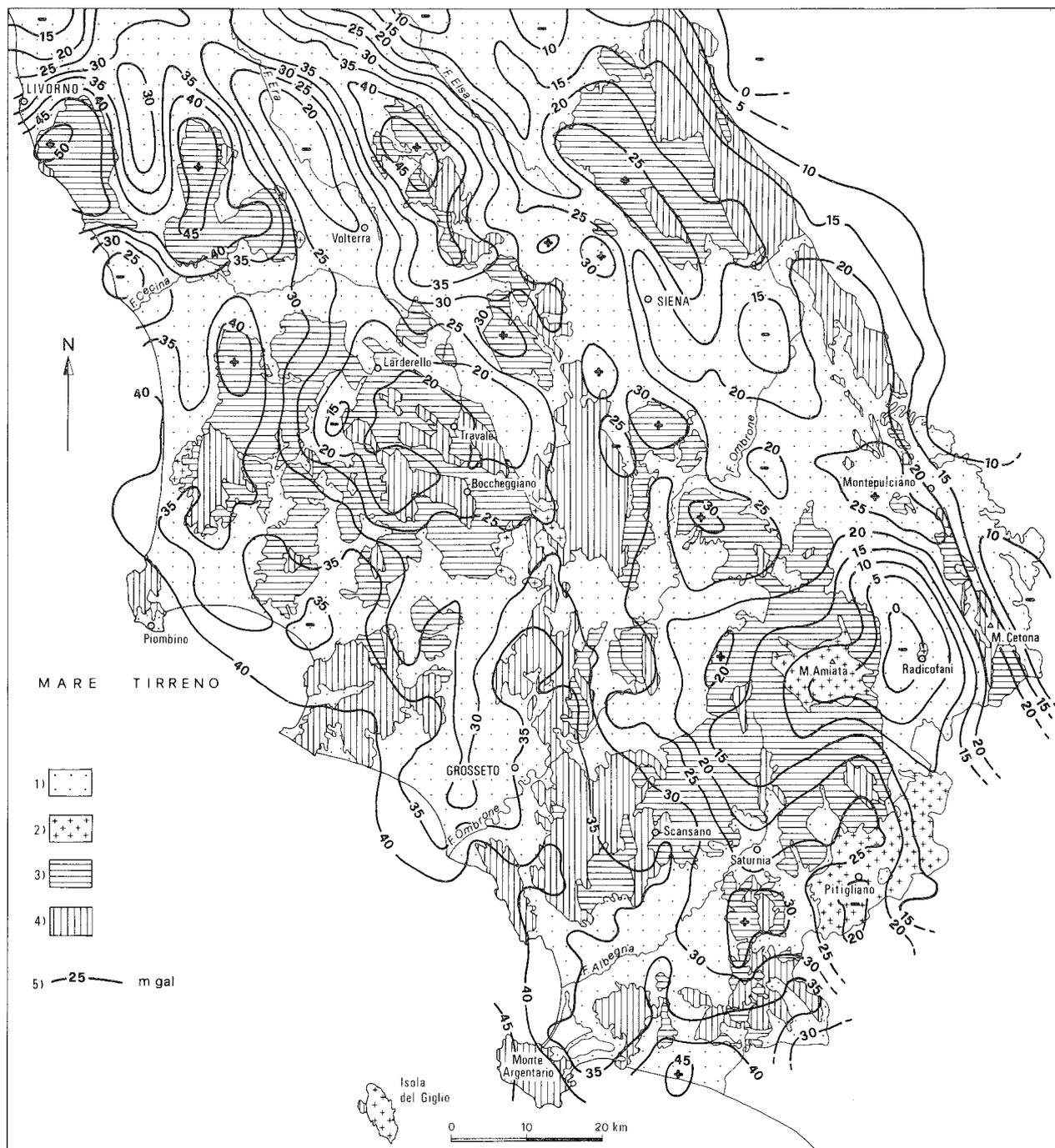


Fig.4 - Carta delle anomalie di Bouguer : 1),2),3),4): vedere fig. 1; 5) linea isoanomala (mgal).

discontinuamente verso Sud-Est (Travale), con valori che giungono a superare i 1000 mW/m^2 . Due zone con anomalia di minore entità, ma con valori comunque al di sopra dei 250 mW/m^2 , sembrano costituire ulteriori propaggini della suddetta anomalia principale: una ad andamento appenninico da Travale verso Boccheggiano, e l'altra ad andamento antiappenninico a Sud-Ovest di Larderello. Procedendo verso il M. Amiata, un'ampia fascia centrata sul medio bacino dell'Ombrone non sembra presentare

particolari anomalie anche se la scarsità di dati a disposizione renderebbe necessarie ulteriori indagini. L'andamento dell'anomalia nella zona amiatina ricalca piuttosto fedelmente quella del gradiente, con i massimi concentrati sul margine meridionale, in corrispondenza dei campi geotermici (Piancastagnaio - Bagnore). L'anomalia cala bruscamente a Sud-Est dell'Amiata (verso il graben di Radicofani), mentre rimane elevata sul lato Sud-occidentale, dove si raggiungono valori superiori ai 300 mW/m^2 .

Continuando verso Ovest, si osserva un abbassamento del flusso fino a valori $<150 \text{ mW/m}^2$ in corrispondenza della "spina fredda" costituita da una fascia di carbonati mesozoici permeabili che causano un forte abbassamento del gradiente geotermico e, quindi, del flusso di calore. Segue, ancora più ad Ovest, una consistente ripresa dell'anomalia in un'ampia zona di affioramento di terreni in facies di flysch cretaceo-eocenici che si allunga a Nord di Scansano, con valori che superano i 350 mW/m^2 . Sembra delinearsi un'estensione di tale ripresa dell'anomalia anche a Sud di Scansano, ma la scarsità di dati attualmente disponibili non consente di andare oltre il livello di semplici ipotesi.

4. CARTA GRAVIMETRICA

Interessanti considerazioni a livello regionale possono derivare dal confronto tra le anomalie termiche e quelle gravimetriche di Bouguer (fig.4). I dati gravimetrici, infatti, oltre a fornire un quadro di anomalie con un più diretto ed immediato significato strutturale, sono anche quelli che ricoprono con maggiore omogeneità l'intera area di studio. Per la costruzione di tale carta sono state utilizzate circa 18000 stazioni gravimetriche che, distribuite su un'area di circa 12000 km^2 , danno una densità di rilievo molto accurata (1.5 staz./km^2). La mappa dell'anomalia di Bouguer è stata elaborata con una densità fissa di 2.4 g/cm^3 , che meglio rappresenta il valore medio delle densità superficiali dell'area. Queste, infatti, sono generalmente comprese tra 2.2 e 2.3 g/cm^3 in corrispondenza di terreni neogenici e vulcanici, e tra 2.5 e 2.6 g/cm^3 per le formazioni in facies di flysch. Per il contouring delle anomalie è stato utilizzato un gridding con passo di 1.5 km ed un raggio di interpolazione di 6 km .

L'andamento appenninico delle principali strutture della Toscana centro-meridionale è ben evidenziato dal campo gravimetrico che mostra un netto allineamento delle isogaliche in direzione NW-SE. I valori delle anomalie variano da 0 mgal , tra Radicofani e M. Amiata, ad oltre 40 mgal , lungo tutta la linea costiera tirrenica. Generalmente buona è la correlazione tra minimi gravimetrici e graben neogenici (Era, Siena, Radicofani), come pure tra alti gravimetrici ed affioramenti delle formazioni carbonatiche e metamorfiche. Tale corrispondenza non esiste nelle aree geotermiche di Larderello e del M. Amiata. Nella prima, in particolare, nonostante gli ampi affioramenti dei terreni più densi appartenenti alla successione carbonatica mesozoica ed al metamorfico paleozoico, tutta l'area compresa tra Larderello, Travale e Boccheggiano è caratterizzata da un minimo gravimetrico relativo ($<20 \text{ mgal}$). Le modellazioni gravimetriche 2D eseguite in tale area (DINI, 1989) hanno evidenziato come per ottenere il best fitting tra l'anomalia osservata e quella calcolata è necessario introdurre un corpo leggero profondo ($7-10 \text{ km}$). L'ampio minimo gravimetrico con valori minimi di 0 mgal , corrispondente al graben di Radicofani, si estende verso Ovest, oltre il M. Amiata, fino a racchiudere con la isogalica di 20 mgal anche zone caratterizzate da

affioramenti carbonatici (ORLANDO *et al.*, 1994). Per spiegare l'anomalia esistente, anche per quest'area è stato necessario imporre un corpo profondo meno denso nel modeling gravimetrico (GIANELLI *et al.*, 1988). In entrambi i casi, per tali corpi profondi, considerando che la densità media è di circa 2.5 g/cm^3 , è ipotizzabile un'origine intrusiva.

5. ALTRI DATI

Esistono ulteriori dati strutturali e geofisici che forniscono interessanti elementi di correlazione con le anomalie termiche e gravimetriche suddette (BALDI *et al.*, 1993). Altri studi che ricoprono la totalità dell'area interessata dal presente lavoro sono relativi alla ricostruzione del sollevamento dei sedimenti marini pliocenici (SESTINI, 1931; TONGIORGI & TREVISAN, 1957; BONADONNA *et al.*, 1975; MARINELLI *et al.*, 1993). La relativa mappa del sollevamento (fig. 5) evidenzia che tutta la fascia tirrenica della Toscana a Sud dell'Arno è caratterizzata da un generale sollevamento dei terreni pliocenici con culminazioni in corrispondenza dei minimi gravimetrici e dei massimi termici. Altri dati geofisici di recente acquisizione sono disponibili essenzialmente per l'area di Larderello. Uno studio integrato su dati magnetometrici, gravimetrici e sismici (RICCERI & STEA, 1992) indica la presenza di un possibile corpo intrusivo granitico a profondità di $1300-2500 \text{ m}$ in un'area ad Ovest di Boccheggiano dove non risultano anomalie termiche di superficie, probabilmente a causa degli ampi affioramenti di rocce carbonatiche permeabili, sede di acquiferi freddi superficiali. Nell'am-

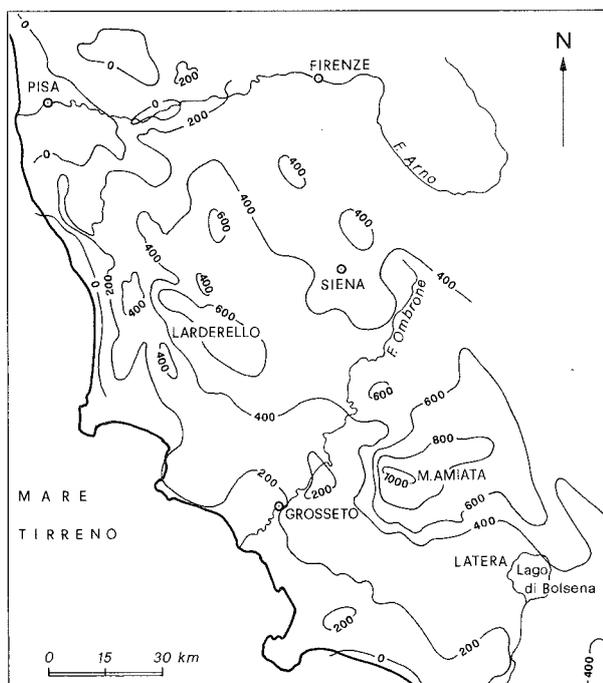


Fig.5 - Carta del sollevamento dei sedimenti neogenici. (Da: BONADONNA *et al.*, 1975).

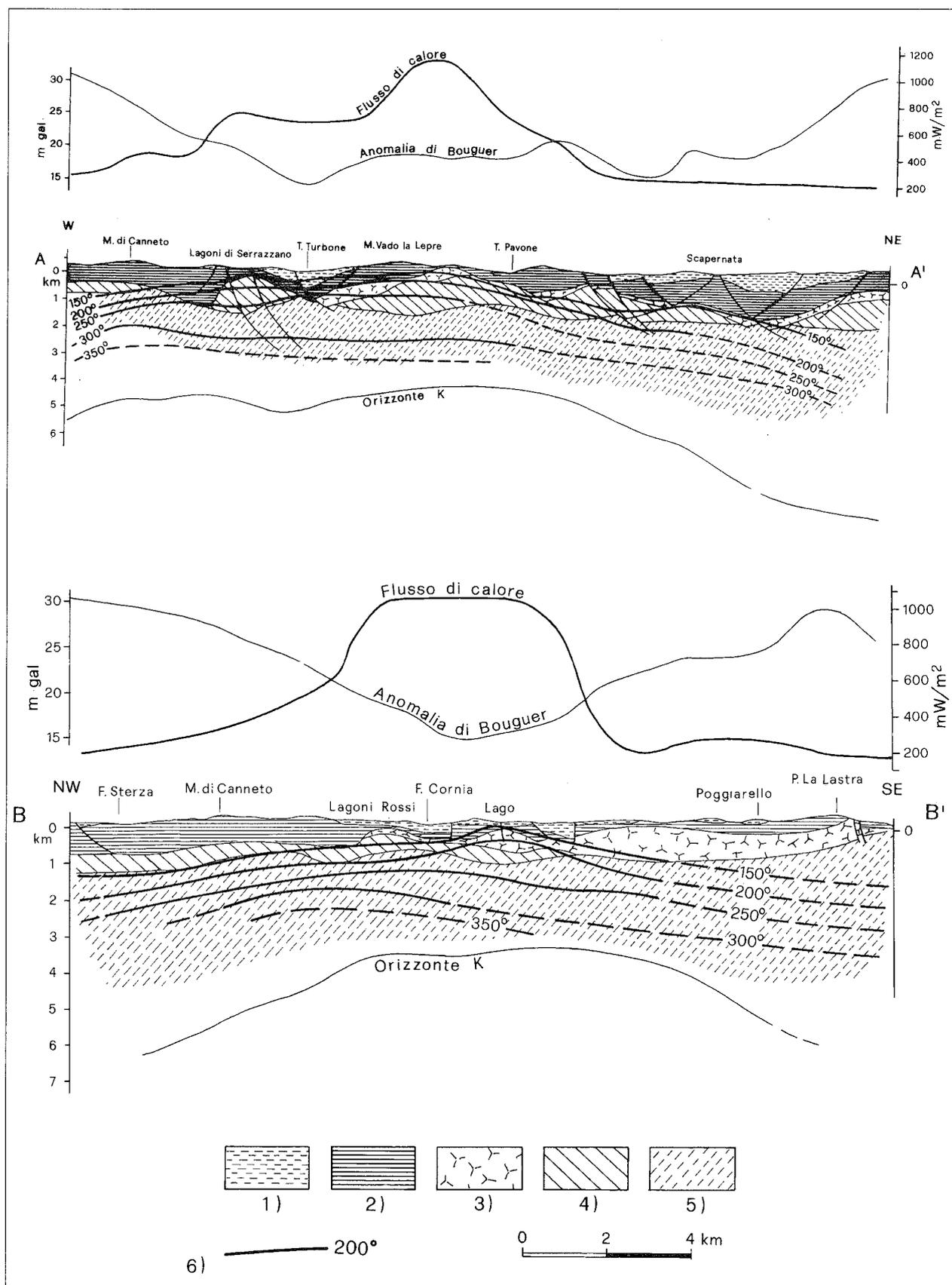


Fig.6 : Sezioni geologiche attraverso il campo geotermico di Larderello. 1) Complesso Neoauctono (Miocene sup.-Pliocene); 2) Complexe ligure e sub-ligure (Cretaceo-Eocene); 3) Falda toscana prevalentemente carbonatica e formazione anidritica di Burano (Trias-Cretaceo); 4) Verrucano s.l.; 5) Basamento metamorfico (filladi, micascisti, gneiss); 6) Linea isoterma (°C). I lineamenti geologici sono ripresi (modificati) da: BALDI *et al.*, (1994), questo volume. (Per l'ubicazione delle sezioni vedere fig. 1).

bito di una collaborazione tra ENEL e MIT, è stata eseguita un'inversione della velocità di propagazione delle onde "P" (FOLEY *et al.*, 1990; BLOCK *et al.*, 1993) che ha utilizzato i dati della sismicità locale e dei telesismi rilevati dalla rete sismica di Larderello. Tale studio ha messo in luce l'esistenza di un ampio corpo caratterizzato da una inversione di velocità posto a circa 7 km di profondità e situato in corrispondenza del massimo dell'anomalia termica di Larderello. Per tale corpo, che si estende fino a circa 20 km di profondità, è stato verificato un aumento del rapporto V_p/V_s , contestualmente ad una diminuzione di V_p . Ciò è in accordo con uno stato di parziale fusione del corpo stesso. Più recentemente, sempre nell'area di Larderello, l'ENEL ha eseguito un rilievo magnetotellurico in modalità Remote-Remote-Reference. L'elaborazione e l'interpretazione con l'inversione 2D di tali dati, eseguite in collaborazione con MIT ed IIRG/CNR (FIORDELISI *et al.*, 1993), ha evidenziato la presenza di un'ampia anomalia conduttiva profonda, assimilabile per profondità ed ampiezza a quella di velocità. Infine, ulteriori dati geofisici di particolare interesse per la definizione delle strutture profonde, sia per l'area Larderello-Travale che per quella Amiata, sono costituiti dai numerosi profili sismici a riflessione eseguiti in tali aree. Questi hanno consentito l'individuazione e la ricostruzione di un orizzonte riflettente continuo, noto in letteratura come orizzonte "K" (BATINI *et al.*, 1978, 1983, 1985) che, per il suo andamento (fig. 6), mostra elementi di discreta correlabilità con le anomalie termiche e gravimetriche.

6. DISCUSSIONE

Il quadro regionale vede tutta la fascia tirrenica toscana caratterizzata da alti valori di anomalia di gradiente e di flusso termico che danno luogo ad anomalie sub-circolari e che, nel loro complesso, degradano verso Est con andamento appenninico lungo la struttura dei graben Elsa-Siena. In particolare, risaltano due ampi poli di massima anomalia localizzati nelle aree geotermiche di Larderello-Travale e del M. Amiata, che racchiudono numerose e più intense anomalie locali. Il quadro gravimetrico della Toscana meridionale si presenta fortemente articolato, evidenziando la complessità geologico-strutturale della regione dove predominano direttrici appenniniche e subordinatamente antiappenniniche. I massimi gravimetrici corrispondono generalmente agli affioramenti del substrato carbonatico e metamorfico, mentre i minimi coincidono con i forti spessori dei meno densi depositi neogenici. Fanno eccezione a questo quadro i due poli geotermici suddetti dove, nonostante la presenza in affioramento di terreni carbonatici e metamorfici più densi, si impostano vaste anomalie gravimetriche negative. In particolare, l'area di Larderello-Travale è caratterizzata da un minimo gravimetrico di forma sub-circolare determinato dalla convergenza dei due trend dominanti, appenninico ed antiappenninico; anche l'area del M. Amiata mostra un minimo gravimetrico ad andamento antiappenninico che

si innesta sul più intenso minimo con trend appenninico, corrispondente al graben di Radicofani. Per entrambe le aree, modellazioni gravimetriche 2D hanno evidenziato la necessità di inserire corpi leggeri profondi per il best fitting delle anomalie osservate. Anche la carta del sollevamento dei sedimenti pliocenici mostra analoghi trend regionali con culminazioni in corrispondenza delle aree geotermiche. In definitiva, l'analisi comparata a livello regionale dei dati termici, gravimetrici e di sollevamento dei terreni pliocenici evidenzia, in corrispondenza dei campi geotermici, la convergenza tra anomalie termiche positive, minimi gravimetrici e massimo sollevamento dei sedimenti pliocenici. In tali aree, inoltre, esiste un'ulteriore coincidenza tra gli elementi suddetti e l'innalzamento dell'orizzonte sismico profondo "K". Per quanto riguarda l'area Larderello-Travale, l'inversione sui dati della sismicità naturale della velocità di propagazione delle onde "P" ha evidenziato un'anomalia profonda (7 km) di bassa velocità che, caratterizzata da una diminuzione di V_p e dell'aumento del rapporto V_p/V_s , può essere associata ad un corpo parzialmente fuso. Inoltre, l'inversione 2D di dati magnetotellurici recenti evidenzia la presenza di un corpo a bassa resistività nella stessa area, a profondità stimate leggermente minori (5 km). In conclusione, la comparazione tra gli elementi geofisici e strutturali considerati porta ad ipotizzare che corpi magmatici con bassi valori di densità, resistività e velocità di propagazione delle onde "P", ancora oggi parzialmente fusi, siano intrusi in una crosta che è verosimilmente assottigliata. Questo concorda con le ipotesi formulate da vari autori (MARINELLI, 1963; CALORE *et al.*, 1981; DEL MORO *et al.*, 1982; MARINELLI, 1984; PUXEDDU, 1984; VILLA *et al.*, 1987; GIANELLI & PUXEDDU, 1992; VILLA & PUXEDDU, 1993). Tali corpi potrebbero rappresentare la fonte di calore profonda che, in corrispondenza dei campi geotermici, causa le ampie anomalie termiche riferibili indicativamente alla linea isoflusso di 200 mW/m². Questo valore di flusso, dello stesso ordine di grandezza di quello ricavato (in regime termico conduttivo) con misure in pozzi profondi, porta a valutare che, alle profondità sopradette, i corpi intrusi ipotizzati siano allo stato parzialmente fuso. Sulle ampie anomalie termiche di base si impostano anomalie di gradiente e di flusso più intense e localizzate (gradiente ≥ 300 °C/km, flusso ≥ 1000 mW/m²), dovute all'attiva circolazione di fluidi geotermici in serbatoi poco profondi. Viceversa, l'attenuazione di anomalie termiche locali può essere causata da circolazioni superficiali di fluidi freddi, in corrispondenza di affioramenti di terreni permeabili. Esternamente alle aree geotermiche esplorate, vi sono altre anomalie termiche (gradiente ≥ 100 °C/km) di minore estensione ed intensità, la cui natura è da verificare per valutarne il potenziale interesse industriale. Tra tali aree è da evidenziare quella recentemente messa in luce ad Ovest della dorsale carbonatica Roccalbegna-Saturnia, e che può rappresentare il proseguimento verso Ovest dell'anomalia del M. Amiata, coincidendo con il margine orientale dell'anomalia gravimetrica negativa dell'intera regione Amiata.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BALDI P., BERTINI G., CAMELI G.M., DECANDIA F.A., DINI I., LAZZAROTTO A. & LIOTTA D. (1994) - *La tettonica distensiva post-collisionale nell'area geotermica di Larderello (Toscana meridionale)*. Questo volume.
- BALDI P., BERTINI G. & CECCARELLI A. (1993) - *Geothermal fields of Central Italy*. Res. Geology, Spec. issue, **16**, 69-81 (in stampa).
- BATINI F., BURGASSI P.D., CAMELI G.M., NICOLICH R. & SQUARCI P. (1978) - *Contribution to the study of the deep lithospheric profiles: deep reflecting horizons in Larderello-Travale geothermal field*. Mem. Soc. Geol. Ital., **19**, 477-484.
- BATINI F., BERTINI G., GIANELLI G., PANDELI E. & PUXEDDU M. (1983) - *Deep structure of the Larderello geothermal field: contribution from recent geophysical and geological data*. Mem. Soc. Geol. Ital., **5**, 219-235.
- BATINI F., DUPRAT A. & NICOLICH R. (1985) - *Contribution of seismic reflection to the study of geothermal reservoirs in Tuscany (Italy)*. Geoth. Res. Comm. Trans., **9**, 245-252.
- BELLANI S., CECCARELLI A., FIORDELISI A., SQUARCI P. & TAFFI L. (1993) - *Sintesi dei dati di gradiente geotermico e di flusso di calore ottenuti da pozzi di profondità medio-piccola perforati nella Toscana centro-meridionale*. Rapporto CNR-IIRG/ENEL-VDAG, Pisa.
- BLOCK L.V., TOKSÖZ M.N. & BATINI F. (1993) - *Velocity structure of the Larderello geothermal system field determined from local earthquake arrival time data*. Journal of Geoph. Res., in stampa.
- BONADONNA F. P., SQUARCI P. & TAFFI L. (1975) - *Sollevamento dei sedimenti neogenici (Toscana e Lazio)*. Rapporto interno inedito CNR-IIRG, Pisa.
- CALAMAI A., CATALDI R., LOCARDI E. & PRATURLON A. (1976) - *Distribuzione delle anomalie geotermiche nella fascia pre-appenninica tosco-laziale (Italia)*. In: Atti del "Simposio internacional sobre energia geotermica en America Latina" - Ciudad de Guatemala, Octubre 1976.
- CALORE C., CELATI R., GIANELLI G., NORTON D. & SQUARCI P. (1981) - *Studi sull'origine del sistema geotermico di Larderello*. Atti 2° Semin. Prog. Fin. Energetica, Sottoprogr. En. Geotermica, 218-225.
- DEL MORO A., PUXEDDU M., RADICATI DI BROZOLO F. & VILLA I.M. (1982) - *Rb-Sr and K-Ar ages on minerals at temperatures of 300-400 °C from deep wells in the Larderello geothermal field, Italy*. Contrib. Miner. Petrol., **81**, 340-349.
- DINI I. (1989) - *Modello strutturale di Larderello: interpretazione dei principali lineamenti geofisici del basamento metamorfico*. Rapporto interno ENEL-VDAG.
- FIORDELISI A., LARSEN J., MACKIE R.L., MADDEN T.R., MANZELLA A. & RIEVEN S.A. (1993) - *Two dimensional modeling of magnetotelluric data from the Larderello geothermal area (Larderello, Italy)*. Rapporto Massachusetts Institute of Technology - CNR/IIRG - ENEL/VDAG - Pacific Marine Environmental Laboratory.
- FOLEY J.E., TOKSÖZ M.N. & BATINI F. (1990) - *Three dimensional inversion of teleseismic travel times for velocity structure in the Larderello geothermal field, Italy*. Geoth. Res. Council Transactions, **14**, Part II.
- GIANELLI G., PUXEDDU M., BATINI F., BERTINI G., DINI I., PANDELI E. & NICOLICH R. (1988) - *Geological model of a young volcanoplutonic system: the geothermal region of Monte Amiata (Tuscany, Italy)*. Geothermics, **17**, n° 5/6, 719-73).
- GIANELLI G. & PUXEDDU M. (1992) - *Geological comparison between Larderello and the Geysers geothermal fields (abstract)*. 28th Int. Geol. Congr., Kyoto, 853.
- GRUBBE K., HAENEL R. & ZOTH G. (1983) - *Determination of the vertical component of thermal conductivity by line source methods*. Zbl. Geol. Palaont. Teil **1**, 49-56.
- MARINELLI G. (1963) - *L'energie géothermique en Toscane*. Annales Soc. Geol. Belgique, **85**, 417-438.
- MARINELLI G. (1984) - *Il magmatismo recente toscano e le sue implicazioni minerogenetiche*. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 111-124.
- MARINELLI G., BARBERI F. & CIONI R. (1993) - *Sollevamenti neogenici ed intrusioni acide della Toscana e del Lazio settentrionale*. Mem. Soc. Geol. Ital., **49**, in stampa.
- MONGELLI F., LODDO M. & TRAMACERE A. (1982) - *Thermal conductivity, diffusivity and specific heat variation of some Travale field (Tuscany) rocks versus temperature*. Tectonophysics, **83**, 33-43.
- MONGELLI F., ZITO G., DELLA VEDOVA B., PELLIS G., SQUARCI P. & TAFFI L. (1987) - *Mappa del flusso geotermico in Italia e mari adiacenti. Stato del progetto e prime valutazioni*. Atti 6° Conv. Gruppo Nazionale Geofisica Terra Solida, Roma, **2**.
- MONGELLI F., PUXEDDU M., SQUARCI P., TAFFI L. & ZITO G. (1991) - *Il flusso di calore e l'anomalia geotermica dell'area tosco-laziale: implicazioni profonde* Studi Geologici Camerti, Vol. speciale, 1991/1, 399-402.
- MONGELLI F., PUXEDDU M. & ZITO G. (1992) - *Anomalie residue del flusso di calore nella fascia Tosco-Laziale. Interpretazione dell'anomalia di Larderello*. Atti 8° Conv. Gruppo Nazionale Geofisica Terra Solida, Roma, **2**, 1147-1170.
- MOUTON J. (1969) - *Contribution des méthodes de prospections géothermiques et géophysiques à l'étude des champs géothermiques de Toscane-Italie*. Bulletin Volcan., **33**, 165-190.
- ORLANDO L., BERNABINI M., CAMELI G.M. & DINI I. (1994) - *Interpretazione preliminare del minimo gravimetrico del M. Amiata*. Questo volume.
- PUXEDDU M. (1984) - *Structure and late Cenozoic evolution of the upper lithosphere in Southwest Tuscany (Italy)*. Tectonophysics, **101**, 357-382.
- RAPPORTO C.E.E. (1988) - *Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland*. 35-42, plates 76-84.
- RICCERI F. & STEA B. (1992) - *Geophysical presence of a deep*

seated "granitic" stock in the Massa Marittima mining district (Grosseto, Southern Tuscany): metallogenetic implications. "Contributions to the geology of Italy", IGCP n° 276, Newsletter, 5, 391 - 400.

SESTINI A. (1931) - *Il mare pliocenico della Toscana meridionale*. Mem. Geol. e Geograf. G. Dainelli, 2, 235-333.

SQUARCI P. & TAFFI L. (1984) - *Surface heat flow map*. In: "Assessment of EC geothermal resources and reserves - Italy". Final Report to the Commission of the European Communities, Contract EGA.AY. 115 I (S).

TONGIORGI E. & TREVISAN L. (1957) - *Les mouvements tectoniques quaternaires en Toscane et dans le Latium Septentrional*. Acta V Congr. Intern. I.N.Q.U.A., Madrid-Barcelona, I, 487-497.

VILLA I.M., GIANELLI G., PUXEDDU M., BERTINI G. & PANDELI E. (1987) - *Granitic dykes of 3.8 Ma age from a 3.5 km deep geothermal well at Larderello (Italy)*. Rend. Soc. Ital. Miner. Petrol., 42, 364.

VILLA I.M. & PUXEDDU M. (1993) - *Geochronology of the Larderello geothermal field: new data and the "closure temperature" issue*. Contrib. Mineral. Petrol., in stampa.

