

## IL FLUSSO DI CALORE E L'ANOMALIA GEOTERMICA DELL'AREA TOSCO-LAZIALE: IMPLICAZIONI PROFONDE

### RIASSUNTO

Utilizzando una elaborazione della mappa del flusso di calore della fascia pre-appenninica tosco-laziale, sono state individuate anomalie allineate in direzione appenninica, corrispondenti generalmente ai massimi sollevamenti dei sedimenti pliocenici. La presenza di queste anomalie è da imputarsi alla tettonica distensiva post-tortoniana conseguente all'assottigliamento litosferico e alla risalita del mantello metasomatizzato e parzialmente fuso: per anatessi di contatto si sono così prodotti magmi cristallini che hanno generato successivamente intrusioni granitiche, sollevamenti della superficie, frammentazione dei bacini di sedimentazione pliocenici e alimentazione un vulcanismo di modesta entità.

Le intrusioni magmatiche sepolte coincidono con le anomalie geotermiche allineate in direzione NW-SE nella parte più orientale della fascia pre-appenninica tosco-laziale. Vengono mantenute attive da un continuo rifornimento di calore e fluidi da parte di un mantello anomalo.

### ABSTRACT

The elaboration of a heat flow map of pre-apenninic region of Tuscany and Latium has brought to the individuation of anomalies aligned NW-SE that show an overall correspondence with areas of maximum uplifting of Pliocene deposits. The cause of such anomalies has to be linked to post-Tortonian extensional tectonics that followed the lithosphere thinning and uplifting of metasomatized and partially melt mantle: by means of contact anatexis crustal magmas were so formed which later on created granitic intrusions, land surface uplifts, fragmentation of Pliocene sedimentary basins and fed a volcanism of modest activity.

Buried magmatic intrusions coincide with geothermal anomalies aligned in apenninic fashion in the easternmost part of Tuscany and Latium. They are kept active by a continuous alimentation of heat and fluids coming from an anomalous mantle.

**PAROLE CHIAVE:** Flusso di calore, Anomalie geotermiche, Lazio - Toscana, Modelli geodinamici.

**KEY WORDS:** Heat flow, Geothermal anomalies, Latium - Tuscany, Geodynamics models.

(\*) Univ. di Bari, Dip. di Geologia e Geofisica, Campus, Bari.

(\*\*) CNR, Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Pisa.

### INTRODUZIONE

La mappa del flusso di calore nella fascia pre-appenninica tosco-laziale è stata filtrata mediante un filtro digitale passa-basso, con una lunghezza di taglio di 150 km. Il risultato è una mappa di significato regionale in cui sono localizzate le anomalie residue (Fig.1). La linea di isoflusso di  $90 \text{ mWm}^{-2}$  racchiude un'area rettangolare con asse maggiore quasi parallelo alla linea di costa tosco-laziale. Poiché il campo regionale è stato interpretato come il risultato di un assottigliamento litosferico, la mappa mostra che il massimo assottigliamento, delimitato dalla isoflusso  $140 \text{ mWm}^{-2}$  coincide con un'area stretta ed allungata intorno alla linea di costa tra l'Elba e Civitavecchia. La mappa delle residue mostra anomalie relativamente ristrette, allineate lungo un asse Roma-Firenze sub-parallelo alla linea di costa, con la sola eccezione dell'anomalia di Larderello eccentrica e leggermente spostata a Ovest rispetto all'asse Roma-Firenze.

Le anomalie riconoscibili sono quelle di Monte Amiata, Torre Alfina, Cesano e Colli Albani. Il valore massimo è raggiunto a Larderello con  $650 \text{ mWm}^{-2}$ . Tali aree mostrano una sorprendente coincidenza con le aree caratterizzate dai massimi valori di sollevamento dei depositi di spiaggia pliocenici (Fig. 2). Le anomalie positive sono affiancate da altre negative con minimi fino a  $-74 \text{ mWm}^{-2}$ , che evidenziano vaste aree poste in corrispondenza a rilievi prevalentemente carbonatici, in cui l'abbassamento dei valori delle anomalie residue è spiegabile con infiltrazioni di acque meteoriche.

### INFORMAZIONI SISMICHE E SISMOLOGICHE

Un lavoro recente di BOCCALETTI *et al.* (1985) rivela un vistoso assottigliamento crustale nella fascia pre-appenninica tosco-laziale coincidente con una vasta area sub-ellittica, ad asse maggiore appenninico NW-SE, centrata su Grosseto. La crosta raggiunge uno spessore minimo di circa 22 km, mentre la crosta superiore non raggiunge i 15 km.

CALCAGNILE e PANZA (1980), sulla base della dispersione delle onde superficiali hanno stimato per questa regione uno spessore litosferico tra i 30 e i 50 km.

BATINI *et al.* (1984) hanno osservato che la massima profondità degli ipocentri dei microsismi non supera gli 8 km di profondità nell'area centrale del campo di Larderello.

Infine BATINI *et al.* (1983) hanno individuato, me-

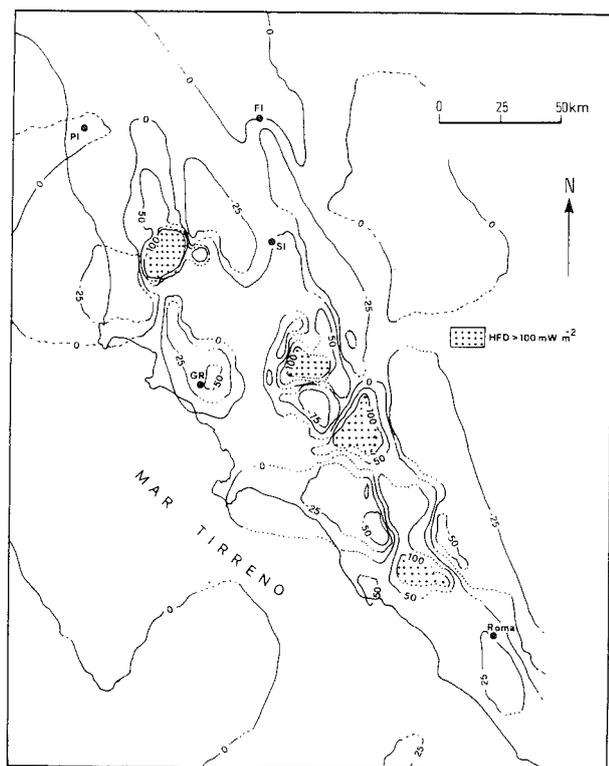


Fig. 1 - Mappa delle anomalie residue del flusso di calore dell'area Tosco-Laziale.

dante la sismica a riflessione nell'area di Larderello, un'orizzonte riflettente di importanza regionale, talora sfrangiato, l'orizzonte K, a profondità variabili tra i 3 e gli 8 km. Lo stesso orizzonte (GIANELLI *et al.* 1988), con una superficie piatta che sprofonda dolcemente dal centro verso la periferia del Massiccio Amiata, è stato scoperto sotto il Monte Amiata a profondità variabile tra i 5 e i 7 km. In entrambi i casi tale orizzonte è stato interpretato come un livello intensamente fratturato e riempito di fluidi geotermici ad alta pressione e temperatura formato dalla parte più profonda dell'incassante e dai livelli superiori del carapace solido, ma ancora molto caldo, di batoliti granitici. E' importante sottolineare la notevole coincidenza tra l'andamento dell'orizzonte K e la distribuzione attuale delle temperature. Altri strutturali, denunciati da una diminuzione della profondità di K, coincidono in modo sorprendente con duomi termici.

L'ipotesi del batolite suggerita da DEL MORO *et al.* (1982) e BATINI *et al.* (1983) per spiegare la lunga durata del campo di Larderello (almeno 3-4 Ma) e il raffreddamento monotono del campo, denunciato da evidenze tessiturali nello studio dei minerali idrotermali e delle inclusioni fluide, ha trovato conferma nei risultati preliminari di uno studio di teleseismica (FOLEY *et al.* 1989) il quale ha rivelato la presenza di un corpo anomalo, allungato in direzione NE-SW, centrato sotto Larderello e radicato nel mantello. Il suo volume è valutabile in  $25 \times 40 \times 35$  km ( $35.000$  km<sup>3</sup>).

## DATI PETROGRAFICI E MAGMATOLOGICI

E' assai probabile che sotto la Catena Appenninica sia presente un *belt* di intrusioni granitiche del tutto simili a quelli che costituiscono, in un contesto di collisione continente- continente, le radici della Catena Alpino-Himalayana e, in un contesto di collisione crosta oceanica-continente, l'ossatura delle Ande e delle montagne Rocciose.

L'allineamento appenninico delle anomalie residue di flusso di calore, spostato a Est rispetto all'area caratterizzata da valori massimi di assottigliamento litosferico e di flusso regionale, è legato alla tettonica distensiva post-tortoniana conseguente all'assottigliamento litosferico e alla risalita di un mantello metasomatizzato, ricco in CO<sub>2</sub> e parzialmente fuso. Per anatessi di contatto si sono prodotte ingenti masse di magmi anatectici crustali derivanti dalla rifusione di rocce metapelitiche cristalline ricche di allumina. Tali magmi, inizialmente sottosaturi in acqua, talora mescolati con quantità variabili di magmi derivanti dal mantello, hanno prodotto differenziati estremi di tipo leucogranitico, comparabili con quelli himalayani, come indicano le estreme povertà in minerali mafici, il forte eccesso di allumina indicata dalla presenza di cordierite, andalusite e muscovite primarie, gli altissimi contenuti in volatili, in particolare B, come testimonia una fascia di rocce incassanti tormalinizzate dello spessore di 600 m intorno al batolite sepolto di Larderello (vedi Pozzo San Pompeo 2) e la comparsa di muscovite primaria per valori di P largamente inferiori (fino a 1,2 kbar) a quelli minimi di 3,5 kbar calcolati per un granito saturo normale. Le temperature minime di fusione ipotizzabili sono di appena 580-680 C, corrispondenti ad una drastica traslazione della curva di solidus del granito, prodotta da contenuti in B e forse in F elevatissimi. Tali riscontri, a parte un probabile contributo in B fornito dalle rocce pelitiche e metapelitiche dell'incassante, conferma la natura in prevalenza metasedimentaria della *parent rock* da cui sono derivati i magmi toscani.

## LE DIVERSE FASI

In un contesto come quello toscano è possibile immaginare che l'assottigliamento litosferico e crostale, e la risalita di un mantello caldo, parzialmente fuso e ricco in volatili abbia prodotto per anatessi di contatto ingenti masse di magmi crustali, durante un arco di tempo di alcuni milioni di anni, compreso tra l'acme termico (tra le due fasi compressive) dell'orogenesi appenninica e l'inizio della distensione. Fino al termine della seconda fase compressiva di età tortoniana continua l'accumulo in profondità e la coalescenza di grandi masse di magmi granitici. Dato il notevole gradiente geotermico di 60-70 C/km la rifusione può aver interessato livelli crustali sia profondi che medi. Inoltre considerate le temperature di fusione molto basse dei leucograniti e la probabile genesi di questi magmi

anche lungo la zona di taglio ensialica della Catena Appenninica, si possono ipotizzare profondità minime di inizio di fusione intorno a 10 km. Al termine dei movimenti compressivi, che segnano la conclusione di quella che possiamo chiamare la fase precedente alla distensione, la litosfera ha spessore normale intorno a 110-120 km, mentre la crosta è ispessita (circa 40 km) e segnata da faglie listriche a causa dei fenomeni compressivi dall'Oligocene al tardo Miocene che generano l'Appennino.

Poi, nella seconda fase di distensione la litosfera si assottiglia riducendosi ad uno spessore minimo di circa 40 km e si riscalda fortemente. La crosta si riduce a circa 20 km e si distende lungo le faglie listriche. La superficie prima si abbassa per distensione tettonica (subsidenza tettonica) generando un bacino di sedimentazione segmentato. Infine la superficie si solleva per dilatazione termica (sollevamento regionale). Per effetto della tettonica distensiva le grandi masse di magmi granitici, parzialmente ibridizzati e, in parte, sospinti dall'ascesa dell'astenosfera sottostante, hanno iniziato la risalita fino a livelli crustali poco profondi (da poche centinaia di metri a qualche chilometro). La messa in posto delle intrusioni granitiche ha accentuato la tettonica distensiva e prodotto sollevamento locale della superficie di origine meccanica e termica e ulteriore segmentazione dei bacini. Si è così formato un *belt* di intrusioni granitiche capaci di alimentare un vulcanismo di modesta entità con volumi di prodotti eruttati che corrispondono a poche unità per cento rispetto agli enormi volumi dei batoliti sottostanti. Le intrusioni magmatiche sepolte, la cui presenza è denunciata da vaste anomalie negative della gravità e da estesi sollevamenti dei depositi pliocenici (vedi Fig. 2), coincidono con una catena di anomalie geotermiche allineate in direzione NW-SE soprattutto nella parte più orientale della fascia pre-appenninica tosco-laziale. Il continuo rifornimento di calore e fluidi da parte di un mantello anomalo ha permesso di mantenere per lungo tempo anomalie geotermiche destinate a scomparire in tempi brevi (da qualche decina a qualche centinaio di migliaia di anni) qualora le sorgenti di calore fossero state piccole intrusioni superficiali prive di radicamento nel mantello. Le prove più evidenti che ci troviamo in presenza di sistemi geotermici di lunga durata (milioni di anni) sono date non solo dai numerosi dati multidisciplinari raccolti a Larderello ma anche dai dati ottenuti nello studio dell'Amiata e di altre aree. Al Monte Amiata il sollevamento prova una completa emersione dell'area già alla fine del Pliocene Inferiore, mentre i dati radiometrici più aggiornati (VILLA, comunicazione personale) danno un'età di soli 0,3 Ma per le vulcaniti amiatine. Analogamente aree come Roccastrada, con vulcaniti di 2-3 Ma mostrano tuttora una rilevante anomalia geotermica. E' assai probabile che il caso di lunga durata, messa in evidenza da altissimi valori del flusso di calore, rappresenti la regola e non l'eccezione in una catena di recente sollevamento come quella appenninica.

La presenza di anomalie geotermiche solo nelle

parti più orientali della fascia pre-appenninica tosco-laziale e la loro assenza proprio lungo la costa, caratterizzata dal massimo assottigliamento crustale e litosferico è riconducibile alle diverse età di messa in posto e ai diversi spessori crustali che ricoprono le intrusioni sepolte. A occidente l'età più elevata di messa in posto e gli spessori fortemente ridotti della copertura hanno consentito un più rapido raffreddamento dei corpi intrusivi sottostanti. In alcuni casi nell'area mineraria di Boccheggiano e Niccioleta è riconoscibile l'esistenza di un sistema geotermico fossile in cui le paragenesi idrotermali di alta temperatura con adularia, epidoto, clorite e titanite sono sostituite da paragenesi di bassa temperatura con calcite, quarzo, clorite, illite e pirite. Nei sistemi attivi come Larderello una situazione di questo tipo è riconoscibile solo nei livelli più superficiali e nelle aree periferiche del campo.

Nella terza fase di raffreddamento, quella attuale, la litosfera si ispessisce di nuovo al ritmo di circa 2.3 km/Ma (attualmente è di 45-50 km) e si contrae per raffreddamento (subsidenza termica). La superficie si abbasserebbe progressivamente ma i bacini soprattutto quelli periferici si riempiono di sedimenti, per cui la sedimentazione viene rimodellata e attenuata. La base della crosta sprofonda (sia pure poco) per isostasia; contemporaneamente a questi fenomeni, avviene il lento monotono raffreddamento dei grandi batoliti granitici radicati nel mantello e forse alimentati periodicamente da piccole pulsazioni e arrivi di nuovo magma. La probabile iniezione di nuovo magma potrebbe spiegare il duomo termico di San Pompeo in cui le temperature elevatissime oggi riscontrate (450-

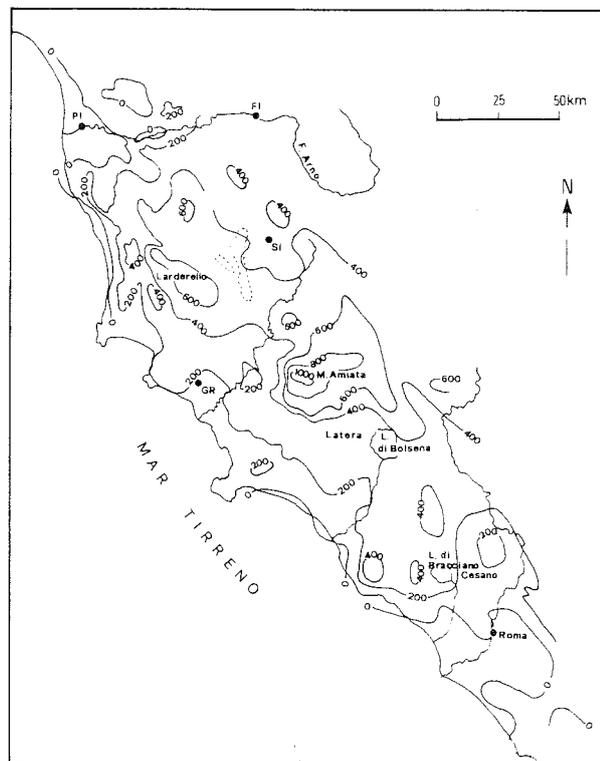


Fig. 2 - Mappa del sollevamento dei sedimenti neogenici.

460°C a 3 km di profondità) sembrano indicare la presenza, nel batolite composito sottostante, di un piccolo duomo magmatico più recente e più caldo rispetto alla massa del batolite circostante. Esiste comunque finora un vistoso contributo di fluidi e volatili provenienti dal mantello metasomatizzato come indicano studi di BOLOGNESI *et al.* (1986) e di HOOKER *et al.* (1985) rispettivamente sulle proporzioni relative di N, Ar e He e sul rapporto  $^3\text{He}/^4\text{He}$  nei fluidi di Larderello. Entrambi gli studi rivelano che il contributo del mantello è valutabile in circa il 40-50% del totale.

Quest'ultimo dato, oltre a quelli precedentemente discussi, e la modellizzazione, qui proposta, avvalorano l'ipotesi di sistemi magmatici-geotermici di lunga durata (milioni di anni) e di grandi dimensioni (decine di migliaia di chilometri cubi radicati nel mantello), in un contesto di litosfera assottigliata durante la fase post-orogenetica di tettonica distensiva che ha interessato l'Appennino.

#### BIBLIOGRAFIA

- BATINI F., BERTINI G., GIANELLI G., PANDELI E. & PUXEDDU M. (1983) - *Deep structure of the Larderello field: contribution from recent geophysical & geological data*. Mem. Soc. Geol. It. **5**, 219-235.
- BATINI F., CONSOLE R. & LUONGO G. (1984) - *Seismological study of Larderello-Travale geothermal area*, U.N. Seminar on Utilization of Geothermal Energy for Electric Power Production & Space Heating, Florence, Italy 14-17 May 1984.
- 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 **117**, vol. 1/2, 7-38.
- BOLOGNESI L., NOTO P. & NUTI S. (1986) - *Studio chimico ed isotopico della Solfatara di Pozzuoli: ipotesi sull'origine e sulle temperature profonde dei fluidi*. Rend. Soc. It. Mineral. Petrol., vol. **41**, 281-295.
- CALCAGNILE G. & PANZA G.F. (1980) - *The main characteristics of the lithosphere-asthenosphere system in Italy & surrounding regions*. Pure Appl. Geophys., vol. **119**, 865-879.
- DEL MORO A., PUXEDDU M., RADICATI DI BROZOLO F. & VILLA I.M. (1982) - *Rb-Sr & K-Ar ages on minerals at temperatures of 300-400°C from deep wells in the Larderello geothermal field (Italy)*. Contrib. Mineral. Petrol. vol. **81**, 340-349.
- FOLEY J.E., TOKSOZ M.N. & BATINI F. (1990) - *Three-dimensional inversion of teleseismic travel times for velocity structure in the Larderello geothermal field, Italy*. Geother. Res. Coun. Transactions, 1413-1419.
- GIANELLI G., PUXEDDU M., BATINI F., BERTINI G., DINI I., PANDELI E. & NICOLICH R. (1988) - *Geological model of a young volcano-plutonic system: the geothermal region of Monte Amiata (Tuscany, Italy)*. Geothermics, vol. **17**, 719-734.
- HOOKER P.S., BERTRAMI R., LOMBARDI S., O'NIONS R.K. & OXBURG E.R. (1985) - *Helium-3 anomalies & crust-mantle interaction in Italy*. Geoch. Cosmochim. Acta v. **49**, 2505-2513, 5 figg.