

## LA TETTONICA DISTENSIVA POST-COLLISIONALE NELL'AREA GEOTERMICA DI LARDERELLO (TOSCANA MERIDIONALE)

Riassunto

Abstract

1. Introduzione

2. Inquadramento geologico

3. La tettonica distensiva nell'area geotermica

4. Discussione

4.1 I Livelli di scollamento ed i sollevamenti della  
Toscana meridionale

5. Conclusioni

Riferimenti bibliografici

### RIASSUNTO

Vengono presentate due nuove sezioni geologiche sull'area di Larderello sulla base dei dati di campagna, dei pozzi profondi e della sismica a riflessione. Questo studio ha portato al riconoscimento di tre diversi eventi deformativi riferibili alla tettonica distensiva che ha interessato la Toscana meridionale dopo l'orogenesi dell'Appennino settentrionale. Il primo di questi eventi è avvenuto durante il Miocene inf. e medio (Aquitano-?Langhiano) ed ha determinato lo sviluppo della così detta "serie ridotta", caratterizzata da faglie dirette che tendono ad orizzontalizzarsi nel livello corrispondente alle evaporiti triassiche; l'evento distensivo intermedio è avvenuto fra il ?Langhiano ed il Messiniano superiore ed è caratterizzato da faglie dirette che tendono ad orizzontalizzarsi in corrispondenza del livello delle filladi paleozoiche; il terzo evento distensivo (Pliocene-attuale) è invece caratterizzato dalle faglie dirette che delimitano le fosse tettoniche plioceniche della Toscana meridionale e che si esauriscono in corrispondenza dell'attuale passaggio fra il dominio fragile e quello duttile, segnalato, all'interno della crosta superiore, dalla fascia di taglio delimitata al tetto da una importante riflessione sismica nota come orizzonte K. In relazione ai fenomeni di sollevamento collegati allo sviluppo della tettonica distensiva post-collisionale, viene suggerito che la posizione del passaggio fragile/duttile abbia subito, fra l'Aquitano e l'Attuale, una migrazione verso i livelli crostali più profondi.

### ABSTRACT

Based on fieldwork, borehole and reflection seismic data, two new geological cross sections through the Larderello geothermal field are here proposed. Three different extensional events have been recognized: the first occurred during Early-middle Miocene

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

\*\* Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Siena - Via delle Cerchia, 3 - 53100 Siena

(Aquitano-?Langhiano) and caused the development of the "serie ridotta" phenomenon. During this event, the normal faults tend to flatten in the late triassic evaporites level. From Langhian to Late Messinian, the second extensional event occurred; it is characterized by normal faults which tend to flatten in the palaeozoic phyllite. The third event (Pliocene-Present) is characterized by the normal faults which bound Pliocene tectonic depressions; these faults tend to die out in the shear zone which is located at the present brittle/ductile boundary, delimited at the top by the K-horizon. It is finally suggested that the crustal uplift, related to the development of the post-collisional extensional tectonics (Aquitano-Present), caused the migration of the brittle/ductile boundary toward deeper levels.

**PAROLE CHIAVE:** tettonica distensiva, passaggio fragile/duttile, Toscana meridionale, Larderello

**KEY WORDS:** extensional tectonics, brittle/ductile boundary, southern Tuscany, Larderello.

### 1. INTRODUZIONE

In questa nota viene esaminata la struttura geologica dell'area geotermica di Larderello (fig. 1) attraverso due nuove sezioni che sono state costruite integrando le precedenti conoscenze con i nuovi dati provenienti da sondaggi profondi e da sezioni sismiche a riflessione. Scopo di questo lavoro è la ricostruzione, attraverso l'esame stratigrafico-strutturale dei Bacini di Serrazzano e di Radicondoli e del loro substrato pre-neogenico, dei vari eventi della tettonica distensiva post-collisionale, dal Miocene inferiore fino all'Attuale. Viene infine presentata una nuova mappa dell'orizzonte K, realizzata attraverso lo studio delle sezioni sismiche a riflessione che attraversano l'area geotermica.

### 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nell'area geotermica di Larderello sono riconoscibili, a partire dall'alto, le seguenti unità stratigrafico-strutturali (fig.2): Complesso dei sedimenti neoautoctoni, Unità delle Liguridi s.l., Unità della Falda Toscana, Unità di Monticiano-Roccastrada, "Complesso degli Gneiss".

*Complesso dei sedimenti neoautoctoni.* Affiora estesamente nelle depressioni tettoniche, delimitate da faglie dirette, ed è discordante sul substrato precedentemente

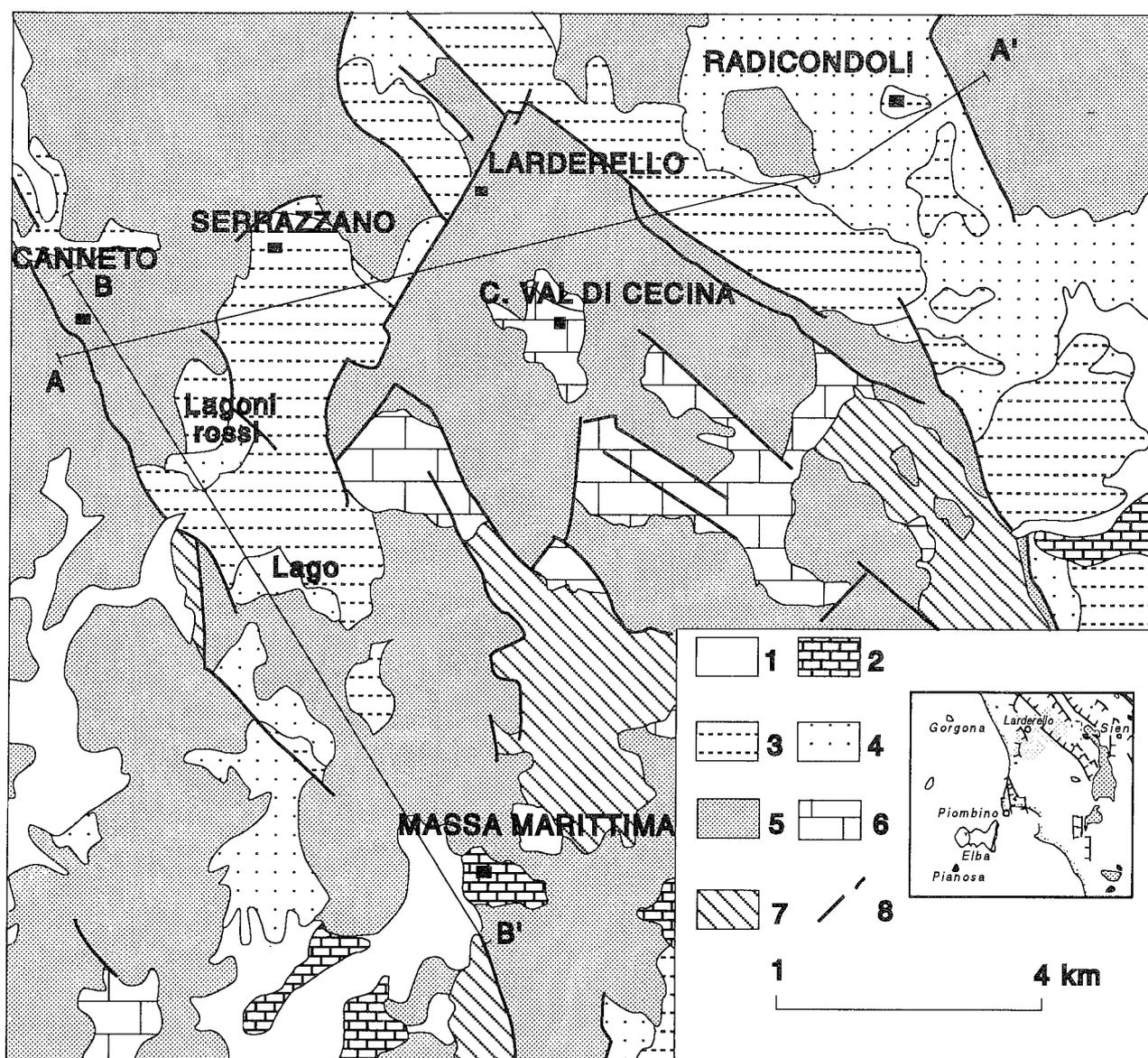


Fig.1 - Schema geologico dell'area di Larderello con le tracce delle sezioni geologiche di fig.4 (A: sezione "Canneto-Radicondoli"; B: sezione "Canneto-Massa marittima"). Spiegazione dei simboli: 1 - alluvioni e depositi quaternari fluvio-lacustri; 2 - travertino; 3 - sedimenti pliocenici; 4 - sedimenti miocenici; 5 - Liguridi; 6 - sedimenti appartenenti alla successione giurassico-oligocenica della Falda toscana; 7 - evaporiti triassiche; 8 - faglie dirette del Miocene superiore-Pleistocene.

deformatosi. Il Complesso dei sedimenti neoautoctoni è costituito: dai depositi lacustri e marino-lagunari del ciclo sedimentario Tortoniano superiore-Messiniano (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978; BOSSIO *et al.*, 1978; BOSSIO *et al.*, 1981); dai sedimenti marini, argillosi e sabbiosi, appartenenti al Pliocene e discordanti sui depositi miocenici o sul substrato preneogeoico (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978). I depositi del Pliocene sono a loro volta suddivisibili in due cicli sedimentari: uno appartenente al Pliocene inferiore ed uno al Pliocene medio. Il primo è caratterizzato in prevalenza da depositi marini di acque relativamente profonde; il secondo è caratterizzato da depositi di mare meno profondo ed è discordante sui sedimenti del Pliocene inferiore, del Messiniano e sul substrato preneogeoico (BOSSIO *et al.*, 1991a; BOSSIO *et al.*, 1991b).

*Unità delle Liguridi.* E' costituita: da ofioliti del Dogger-Malm; dalla successione sedimentaria dei depositi pelagici del Malm (Radiolariti) e del Cretaceo inferiore (Calccare a Calpionelle e Argille a Palombini); dai depositi dei flysch cretaceo-paleogenici (Gruppo delle Argille e calcari, Gruppo di S.Fiora, Gruppo di Monteverdi-Lanciaia). Le Liguridi, in seguito alla tetto-genesi appenninica, sovrascorsero verso Est sul Dominio toscano durante l'Oligocene superiore-Aquitano.

*Unità della Falda toscana.* Deriva dal Dominio toscano ed è costituita da formazioni di età triassico-oligoceniche (o del Miocene inferiore). La sequenza sedimentaria riflette una evoluzione legata ad ambienti prima evaporitici (F. delle anidriti di Burano del Trias superiore), poi di piattaforma carbonatica (Calccare a *Rhaeticavicula* del Retico,

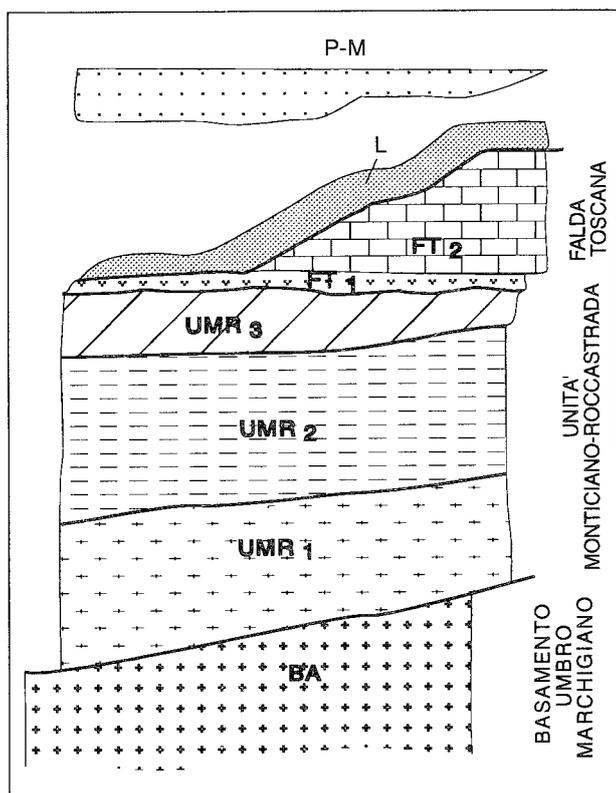


Fig. 2 - Schema dei rapporti esistenti fra le Unità stratigrafico-strutturali della zona di Larderello. Spiegazione dei simboli: PM - complesso dei sedimenti neoautoctoni; L - Liguridi; Falda toscana: FT2 - successione triassico-oligocenica; FT1 - anidriti triassiche; Unità di Monticiano-Roccastrada: UMR3 - gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche; UMR2 - gruppo filladico-quarzitico; UMR1 - gruppo dei Micascisti; BA: complesso degli Gneiss.

Calcare massiccio del Lias inferiore) e di bacino pelagico (Calcare selcifero del Lias medio-superiore, Marne a *Posidonomia* del Dogger, Diaspri del Malm, Scaglia Toscana del Cretaceo inferiore-Oligocene) ed infine di avanfossa subsidente (Macigno dell'Oligocene-?Aquitano).

La "Falda toscana", sfruttando il livello plastico delle evaporiti triassiche, è sovrascorsa alla Zona di Massa (futura Unità di Monticiano-Roccastrada) nell'Oligocene superiore-?Aquitano e sulle formazioni del Dominio umbro-marchigiano nel Tortoniano.

*Unità di Monticiano-Roccastrada.* E' suddivisibile in tre gruppi formazionali:

— Gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche. Questo gruppo si presenta strutturato in scaglie sovrapposte, frequentemente separate da livelli anidritico-dolomitici del Trias superiore.

— Gruppo filladico-quarzitico. Comprende formazioni paleozoiche caratterizzate da una strutturazione alpina e da relitti di scistosità pre-alpina; questo gruppo è stato riferito ad una età "pre-sudetica" da COSTANTINI *et al.* (1988) e da ELTER & PANDELLI (1990).

— Gruppo dei Micascisti che, similmente al gruppo

precedente, è rappresentato da rocce con strutturazioni alpina ed ercinica.

"Complesso degli Gneiss" (ELTER & PANDELLI, 1990). In questo complesso, che è separato dall'Unità di Monticiano-Roccastrada da una fascia milonitica, non sono stati riconosciuti eventi metamorfici alpini; esso pertanto è stato interpretato come parte del basamento dell'avampaese umbro-marchigiano (BERTINI *et al.*, 1991).

### 3. LA TETTONICA DISTENSIVA NELL'AREA GEOTERMICA

La parte interna dell'Appennino settentrionale è stata interessata, durante il Neogene-Quaternario, da una intensa tettonica distensiva accompagnata da attività magmatica.

Nella zona di Larderello, BERTINI *et al.* (1991) distinguono due diversi eventi distensivi: nel primo, il grado di estensione è di almeno il 60%; nel secondo, il grado di estensione è intorno al 7%. Durante il primo evento, riferito ad un periodo compreso fra il Miocene inf. ed il Tortoniano superiore, si sono sviluppati i particolari rapporti strutturali che consistono nella diretta anomala sovrapposizione delle Liguridi alla formazione anidritica della Falda toscana od al Verrucano od alle filladi dell'Unità Monticiano-Roccastrada; la mancanza dei termini mesozoici e terziari della Serie toscana è indicata dagli studiosi della geologia della Toscana meridionale (SIGNORINI, 1949; GIANNINI *et al.*, 1971) con il termine di "serie ridotta".

Le strutture della "serie ridotta" sono descrivibili come faglie dirette a geometria complessa del tipo *flat-ramp-flat* (fig.3) che si esauriscono nel livello delle anidriti triassiche (DECANDIA *et al.*, 1992; DECANDIA *et al.*, 1993).

Il confronto fra la struttura della Toscana meridionale e quella delle Alpi Apuane ha inoltre suggerito che, durante il primo evento distensivo, in corrispondenza del livello delle anidriti triassiche, si sia sviluppata una zona di taglio che divideva una parte superiore, caratterizzata da deformazione fragile, da una inferiore, caratterizzata da deformazione duttile e/o semi-duttile (CARMIGNANI & KILGFIELD, 1990; BERTINI *et al.*, 1991; CARMIGNANI *et al.*, 1994b).

L'evento distensivo che ha determinato la "serie ridotta" è stato attribuito da CARMIGNANI *et al.* (1994a) al Burdigaliano-?Langhiano sulla base dell'età dei sedimenti burdigaliani e langhiani affioranti nella Toscana meridionale e correlabili con quelli coevi affioranti nella Corsica orientale ed in Sardegna e sulla base di dati radiometrici ottenuti sulle Alpi Apuane.

Durante il secondo evento, avvenuto a partire dal Tortoniano superiore, si sono sviluppate faglie a geometria listrica che dislocano tutte le strutture precedentemente realizzatesi. Queste faglie avrebbero dato origine alle fosse tettoniche mio-plioceniche della Toscana meridionale e tenderebbero ad orizzontalizzarsi in corrispondenza della zona di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K e che si colloca all'attuale passaggio fra il dominio fragile e

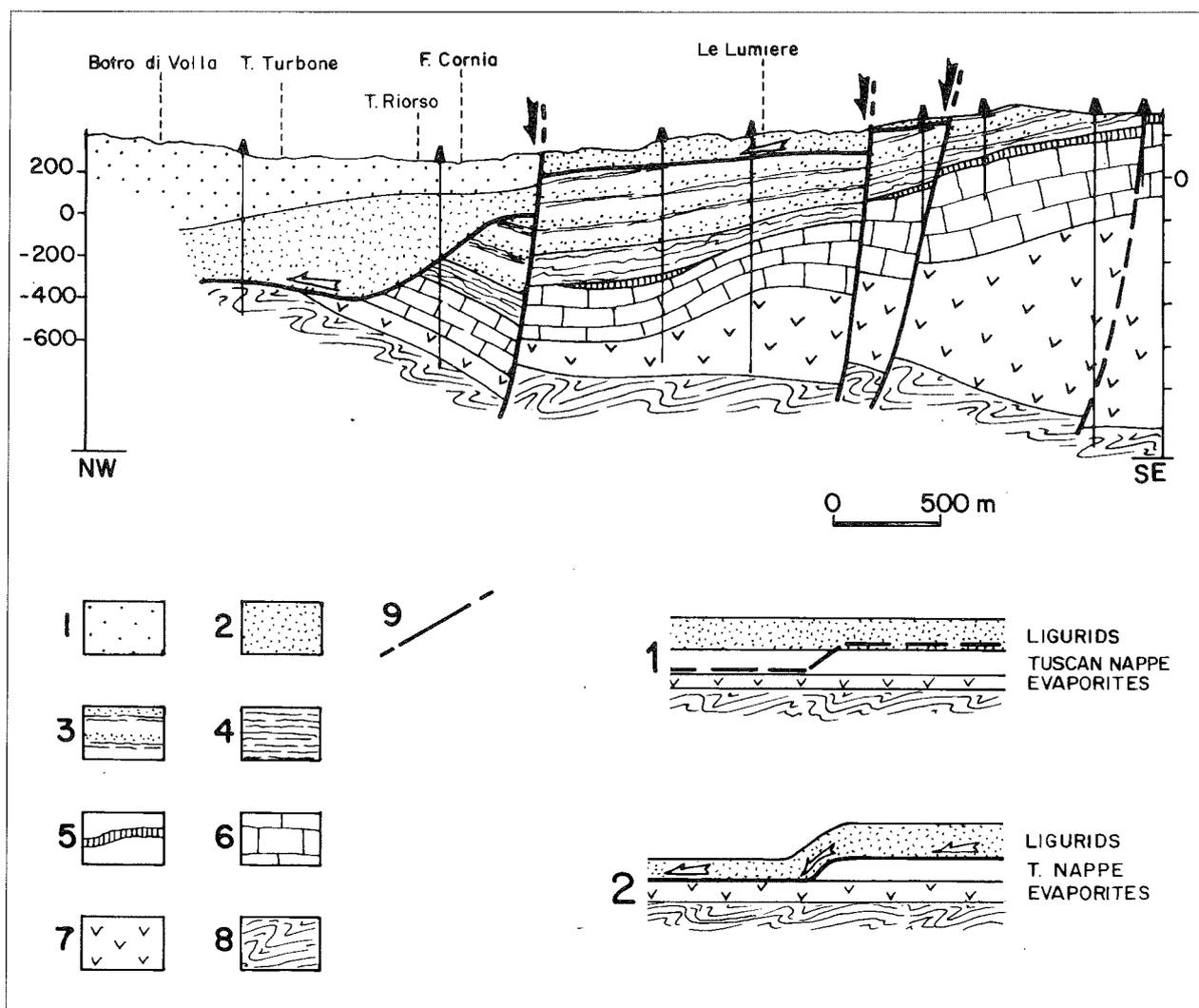


Fig. 3 - Il primo evento distensivo ha determinato faglie dirette, indicate dalle frecce bianche, a geometria articolata con due *flat* principali localizzati alla base delle unità liguri e dentro le anidriti triassiche e collegate da una rampa che attraversa l'intera successione della Falda toscana. Le faglie dirette indicate dalle frecce nere e che tagliano le strutture della "serie ridotta", sono riferite ad eventi distensivi successivi. Simboli: 1 - complesso dei sedimenti neoautoctoni; 2 - Liguridi (Cretaceo inf.-Eocene sup.) 3 - Macigno (Oligocene superiore-?Aquitano); 4 - Scaglia toscana (Cretaceo inferiore - Oligocene); 5 - Diaspri (Malm); 6 - successione carbonatica (Trias superiore-Giurassico) 7 - Formazione anidritica di Burano (Trias superiore); 8 - substrato metamorfico; 9 - faglie dirette (da LAZZAROTTO, 1967; in CARMIGNANI *et al.*, 1994a).

quello duttile (BERTINI *et al.*, 1991; CAMELI *et al.*, 1993).

I dati che qui vengono presentati permettono alcune nuove considerazioni sullo sviluppo della tettonica distensiva dopo il Langhiano.

Sono state costruite due sezioni geologiche (fig.4) integrando i dati provenienti da indagini di superficie e di pozzi profondi con i dati di sezioni sismiche a riflessione: la sezione "Canneto-Radicondoli" orientata circa W-E, e la sezione "Canneto-Massa Marittima", orientata circa NW-SE, parallelamente al tracciato del progetto CROP 18, e che è utile ad una preliminare definizione delle strutture che verranno sismicamente indagate.

La zona interessata dalla sezione "Canneto-Radicondoli" (fig.4/A), dove sono ubicati numerosi sondaggi, è caratterizzata a partire dal basso da: un orizzonte continuo di filladi; blocchi asimmetrici riferibili alla Unità Monticiano-Roccastrada e delimitati da faglie dirette che

determinano depressioni in corrispondenza delle quali si collocano i bacini di Serrazzano e Radicondoli; un sistema di faglie a geometria listrica che tagliano tutte le strutture precedenti, compreso il livello delle filladi, e che tendono ad orizzontalizzarsi in corrispondenza della zona di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K.

La sezione "Canneto-Massa Marittima" (fig.4/B) mette in evidenza le strutture con direzione circa SW-NE. Si tratta di superfici di discontinuità, circa perpendicolari alle faglie dirette che delimitano il Bacino di Serrazzano; esse si collocano in corrispondenza di una importante fascia di deformazione e discontinuità regionale, nota in letteratura come Linea "Piombino-Faenza" (BARTOLINI *et al.*, 1983). Nella sezione sono anche rappresentati i filoni aptitici (da 3,8 a 2,8 Ma., in: BATINI *et al.*, 1985; VILLA *et al.*, 1987) incontrati in alcuni sondaggi profondi ed interpretati come apofisi di una vicina massa granitica.

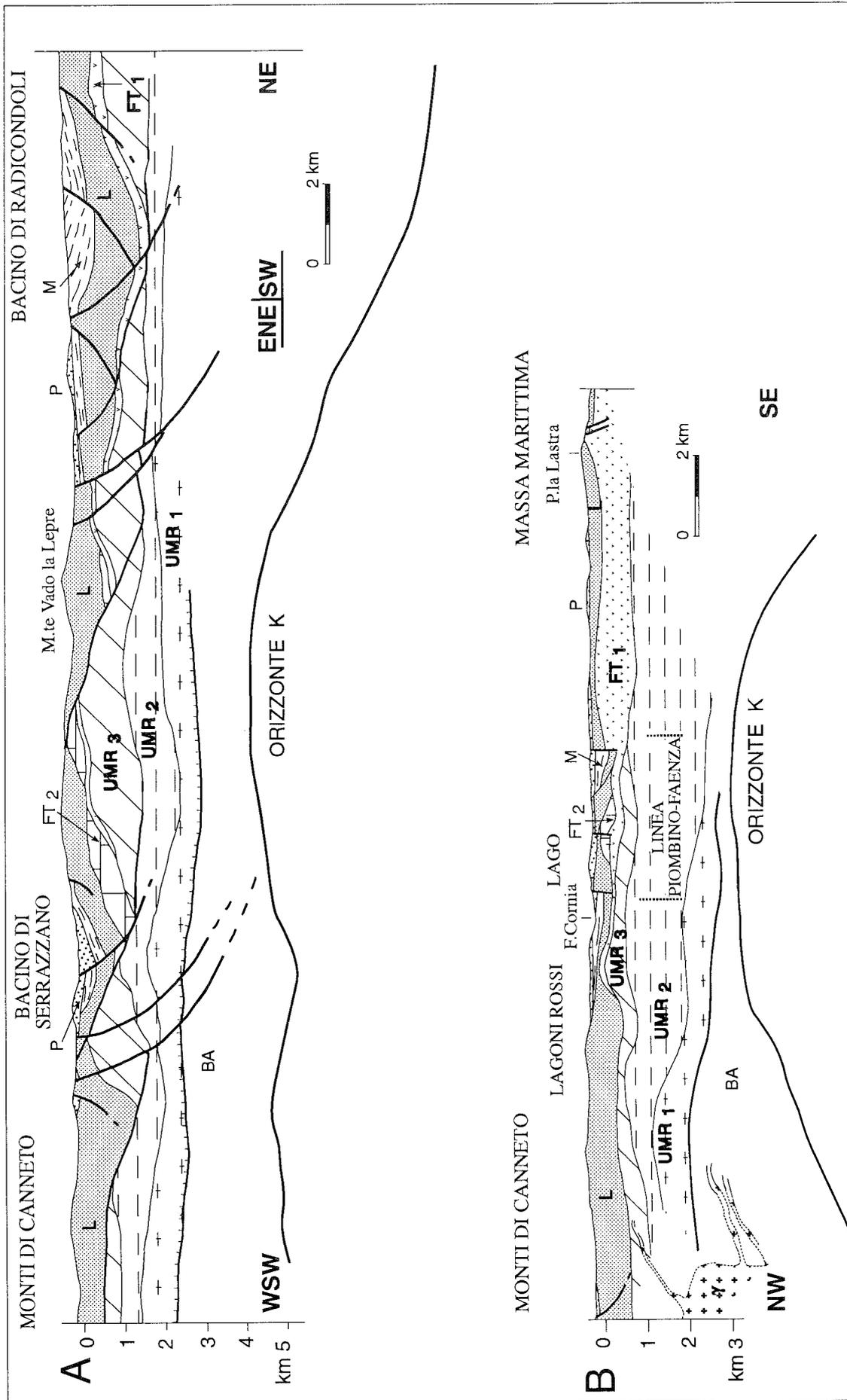


Fig. 4 - A) sezione "Canneto-Radicondoli" (la traccia è indicata in fig. 1). Spiegazione dei simboli: P - sedimenti piocenici; M - sedimenti del Miocene superiore; L - Liguridi; Falda toscana: FT2 - successione triassico-oligocenica; FT1 - anidriti triassiche; Unità di Monticiano-Roccastrada: UMR3 - gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche; UMR2 - gruppo filladico-quarzitico; UMR1 - gruppo dei Micasisti; BA: complesso degli Gneiss. B) sezione "Canneto-Massa marittima" (la traccia è indicata in fig. 1). Questa sezione, parallela al tracciato CROP 18, mette in evidenza discontinuità orientate in direzione SW-NE che sono interpretabili come parte della deformazione riferibile alla Linea "Piombino-Faenza". La presenza di una massa granitica (g) è ipotizzata pre la presenza di filoni aplitici incontrati in alcuni sondaggi profondi.

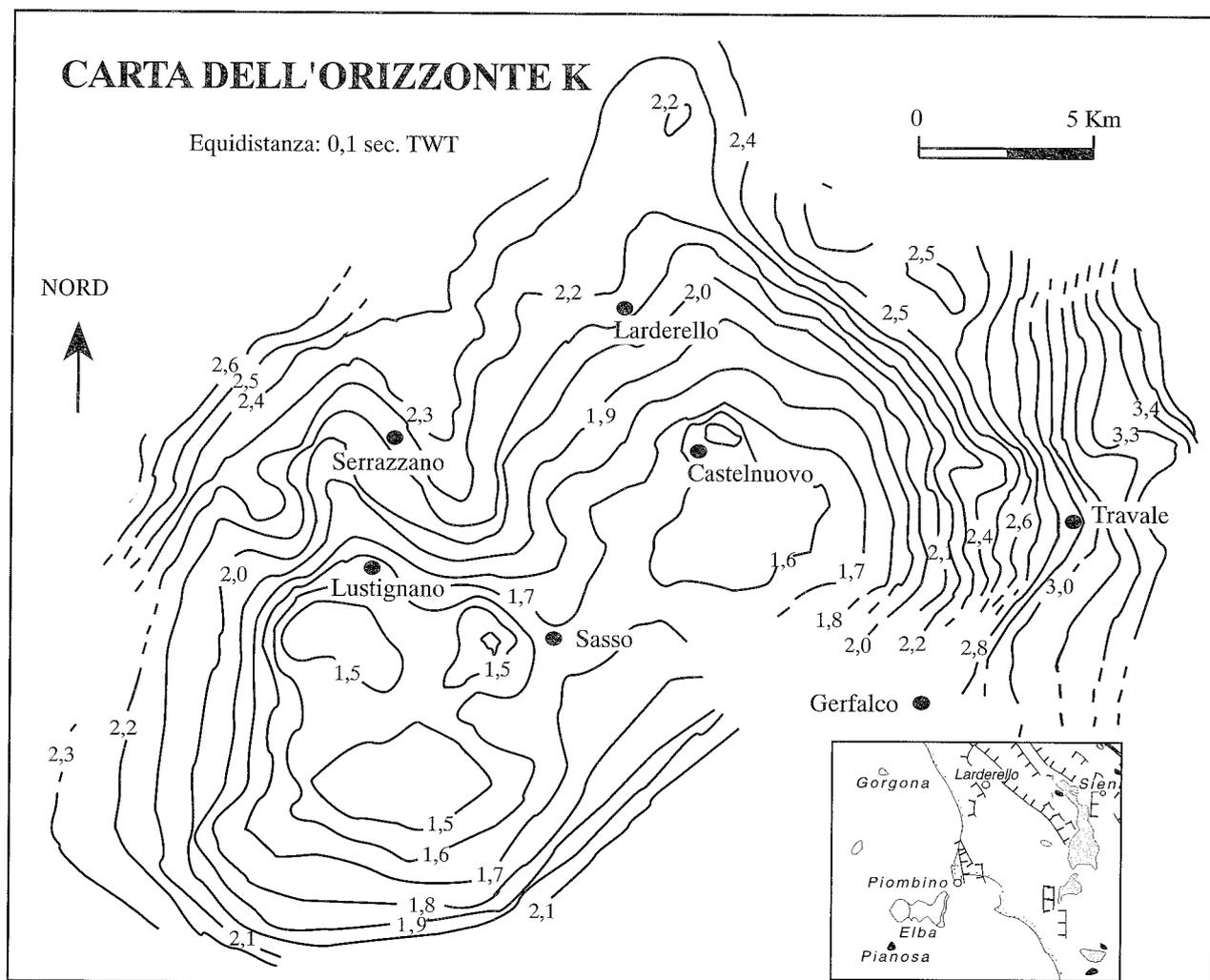


Fig. 5 - La carta dell'orizzonte K nell'area geotermica di Larderello è stata costruita tramite l'interpolazione di 396 dati, distribuiti in maniera sufficientemente omogenea. L'orizzonte K è stato anche riconosciuto nel Bacino di Siena-Radiconani, a circa 9 km di profondità (NICOLICH & MARCHETTI, 1982) e nella zona del Monte Amiata, a circa 5 km di profondità (GIANELLI *et al.* 1988).

In ambedue le sezioni di fig. 4 l'andamento dell'orizzonte K mostra una geometria nell'insieme cupoliforme; la sua morfologia, espressa con isolinee con equidistanza di 0,1 sec. TWT, è messa in evidenza dalla mappa di fig. 5, ottenuta analizzando le numerose linee sismiche che attraversano l'area geotermica di Larderello.

Il risultato più evidente è la presenza, nell'andamento dell'orizzonte K di alti e bassi morfologici e del rapido approfondimento di detto orizzonte ai margini dell'area geotermica. Precedenti lavori indicano, nell'area geotermica di Larderello, una profondità dell'orizzonte K variabile fra i 3 km ed almeno i 6 km (BATINI *et al.*, 1983; BATINI *et al.*, 1985).

#### 4. DISCUSSIONE

La sezione geologica "Canneto-Radicondoli" (fig. 6/A) e le sezioni retrodeformate sequenzialmente (fig. 6 B/C) indicano che esistono almeno tre eventi distensivi: uno,

di età compresa fra il Pliocene e l'attuale; un altro di età compresa fra il ?Langhiano ed il Messiniano superiore; ed infine uno di età compresa fra l'inizio del Burdigaliano ed il ?Langhiano.

In fig. 6/A che rappresenta la situazione strutturale attuale nell'area di Larderello, i sedimenti pliocenici dei Bacini di Serrazzano e di Radicondoli mostrano una generale immersione verso Ovest collegata a faglie dirette; (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1965; MAZZANTI, 1966; LAZZAROTTO, 1967; LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978) attive almeno dopo il Pliocene medio (età dei sedimenti più recenti deformati: BOSSIO *et al.*, 1991). Le indagini di campagna e le sezioni sismiche a riflessione hanno messo in evidenza che queste faglie hanno geometria listrica e che esse tendono ad orizzontalizzarsi in corrispondenza della zona di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K; esse dislocano tutte le strutture precedentemente sviluppatesi e riferibili al secondo ed al primo evento distensivo.

In fig. 6/B è stata ricostruita, lungo la sezione "Canneto-Radicondoli", la situazione strutturale al Pliocene. Que-

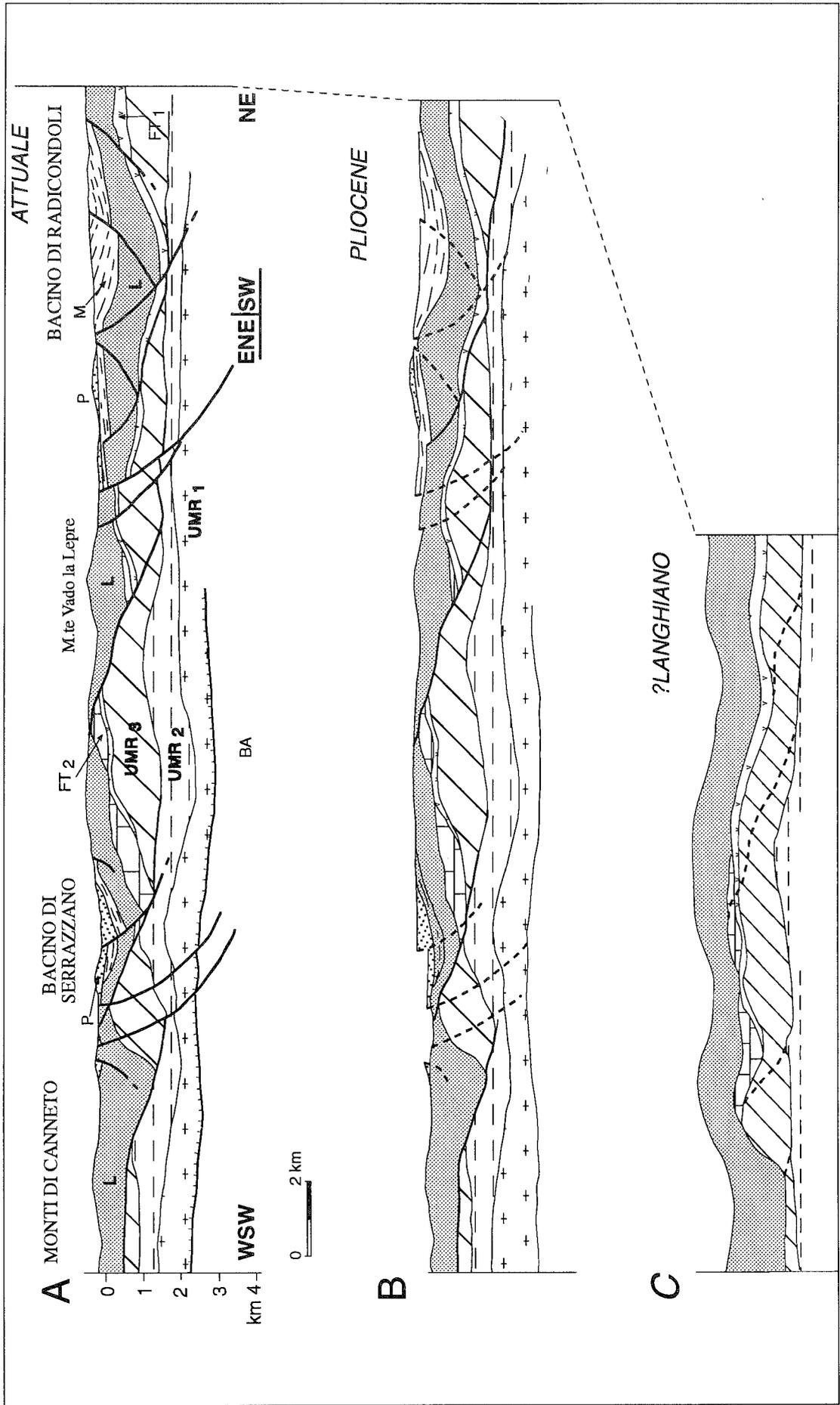


Fig. 6 - A) ATTUALE: sezione geologica "Canneto-Radicondoli" di fig. 4/a. I sedimenti del Pliocene sono deformati da faglie dirette listriche. Queste faglie dislocano tutte le strutture precedentemente formatesi. Spiegazione dei simboli: P - sedimenti pliocenici; M - sedimenti del Miocene superiore; L - Liguridi; Falda toscana: FT2 - successione triassico-oligocenica; FT1 - anidriti triassiche; Unità di Monticiano-Roccastrada: UMR3 - gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche; UMR2 - gruppo filladico-quarzitico; UMR1 - gruppo dei Micasisti. BA: complesso degli Gneiss. B) PLIOCENE: questa sezione è stata costruita eliminando l'effetto delle faglie dirette del terzo evento distensivo; la trasgressione pliocenica avviene sui sedimenti messiniani già deformati. C) ? LANGHIANO: questa sezione è stata costruita eliminando l'effetto delle faglie dirette del secondo evento distensivo ed ottenendo così la condizione strutturale alla fine dell'evento distensivo che ha originato la "serie ridotta".

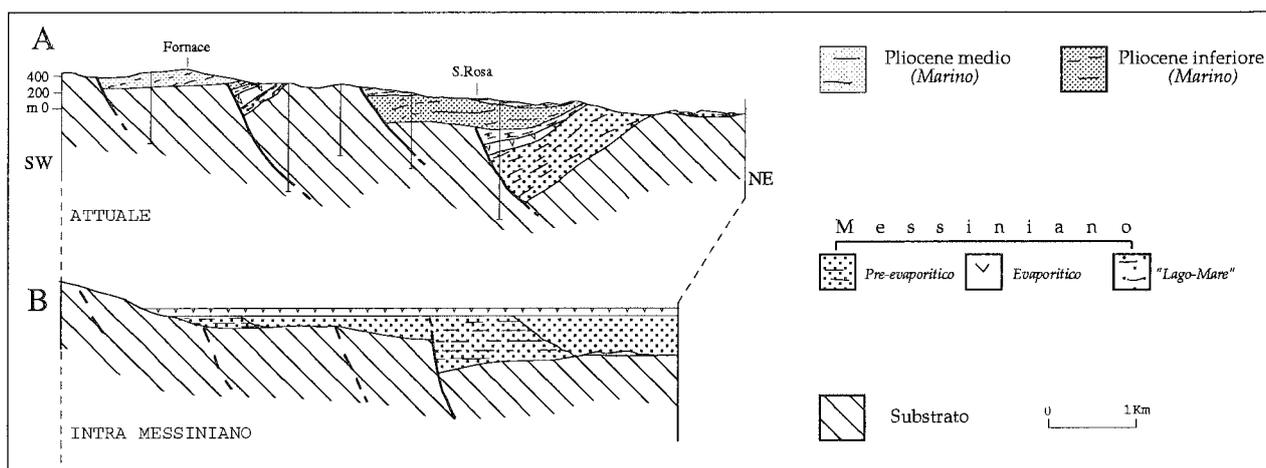


Fig. 7 - A - Sezione geologica attraverso il margine occidentale del Bacino di Pomarance, ubicata pochi chilometri a Nord della sezione di fig. 6/A. Superfici erosive sono state riconosciute al contatto fra i sedimenti del Pliocene inferiore e quelli del Pliocene medio e tra i sedimenti del Messiniano e del Pliocene inferiore (da MAZZANTI, 1965; con modifiche). B - L'attività sin-sedimentaria delle faglie dirette riferite al secondo evento distensivo (?Langhiano-Messiniano sup.) è documentata dal diverso spessore dei sedimenti messiniani pre-evaporitici.

sta sezione retrodeformata permette di valutare la estensione pliocenica nell'ordine del 3% e di osservare che i sedimenti pliocenici, prima dello sviluppo delle faglie dirette, dovevano coprire pressoché tutta la zona rappresentata nella sezione ed è quindi verosimile ritenere che la zona di Larderello abbia costituito una area emersa solo dopo il Pliocene medio.

La stessa sezione conferma anche che i depositi evaporitici del Messiniano erano già piegati prima della trasgressione pliocenica. Circa il piegamento di questi sedimenti si possono fare due ipotesi: la prima prevede che le pieghe nei depositi miocenici, rilevate anche in altre aree della Toscana meridionale (ad esempio nel Bacino del Casino, LAZZAROTTO & SANDRELLI, 1979), insieme alle discordanze fra sedimenti appartenenti ai cicli sedimentari mio-pliocenici, siano riferibili ad eventi compressivi che, a partire dal Miocene superiore, si sono intervallati al generale regime distensivo che interessa la parte interna dell'Appennino settentrionale (BERNINI *et al.* 1990; BONINI *et al.*, 1992; BOCCALETTI *et al.* 1992, *cum bibl.*); la seconda ipotesi, che qui illustriamo, prevede invece che le pieghe del Miocene superiore siano da attribuire all'attività delle faglie dirette rotazionali che si appiattiscono nel livello di scollamento in corrispondenza delle filladi paleozoiche. La contemporaneità fra l'attività di queste faglie e la sedimentazione miocenica è documentata nell'area di Pomarance, a NW della sezione "Canneto-Radicondoli" (fig. 7).

In fig 6/C è rappresentata la situazione strutturale alla fine del primo evento distensivo. Questo evento, durante il quale si realizzano quei particolari rapporti indicati come "serie ridotta" e che si sviluppano per la presenza di un importante livello di scollamento corrispondente alla formazione anidritica triassica, termina probabilmente con il Langhiano (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; CARMIGNANI *et al.*, 1994a; CARMIGNANI *et al.*, 1994b).

Fra il ?Langhiano ed il Miocene superiore lo scollamento

principale si localizza nel livello delle Filladi paleozoiche e la estensione è dell'ordine del 36%.

#### 4.1 I livelli di scollamento ed i sollevamenti della Toscana meridionale

Nella zona di Larderello, sono dunque riconoscibili tre diversi orizzonti di scollamento: il primo è il livello di anidriti triassiche nel quale, durante il Burdigaliano-Langhiano, si appiattivano le faglie dirette che hanno dato origine alla "serie ridotta"; il secondo sono le filladi paleozoiche, nel quale si appiattivano le faglie dirette di età compresa fra il ?Langhiano ed il Messiniano superiore; il terzo è la zona di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K, nel quale si appiattiscono le faglie dirette attive tra il ?Pliocene e l'Attuale.

Durante l'evento distensivo del Burdigaliano-Langhiano, il livello di scollamento corrispondente alle evaporiti triassiche coincideva anche con il passaggio reologico dalla deformazione fragile alla deformazione duttile (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; CARMIGNANI *et al.*, 1994a; CARMIGNANI *et al.*, 1994b).

Analogo significato reologico è stato attribuito, sulla base della distribuzione degli ipocentri e sulla base dei valori di temperatura registrati nei pozzi profondi di Larderello, alla fascia di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K (CAMELI *et al.*, 1993).

La posizione del passaggio reologico dipende da più fattori quali la litologia o la presenza di fluidi ma, a parità di altre condizioni, dipende principalmente dalla temperatura e quindi dalla posizione all'interno della crosta delle isoterme che si collocano intorno ai 4-500°C; il fatto che la posizione dell'attuale passaggio fragile/duttile risulti, nell'area di Larderello, estremamente vicino alla superficie, può essere considerato una conseguenza dell'elevato flusso termico che interessa l'area di Larderello e, più in

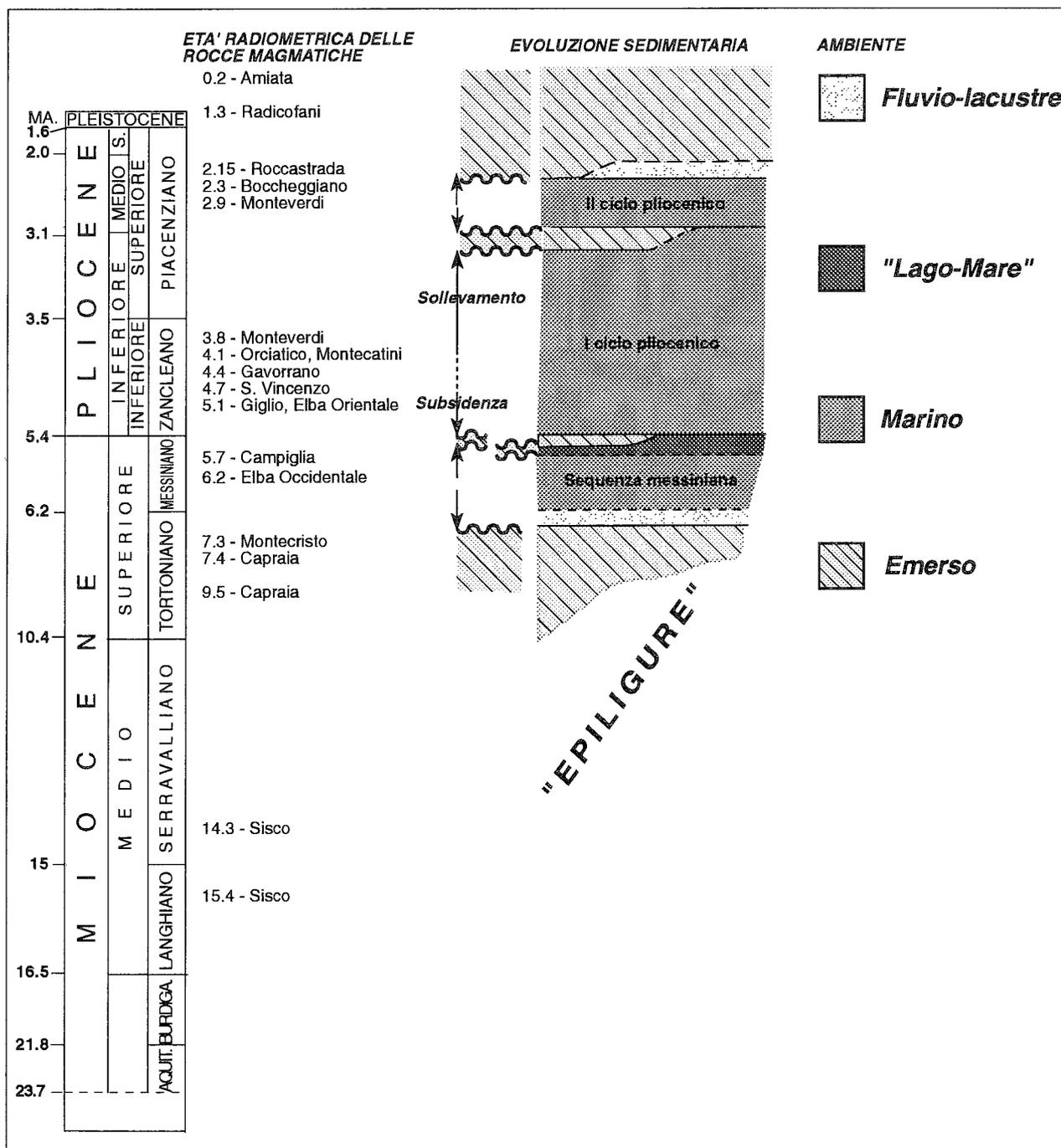


Fig. 8 - L'attività magmatica del Neogene è confrontata con gli episodi di sollevamento e subsidenza avvenuti durante questo stesso periodo di tempo. Le caratteristiche del magmatismo toscano suggeriscono che il riscaldamento della litosfera è un aspetto costante durante lo sviluppo della tettonica distensiva. Notare che i periodi con maggiore attività magmatica corrispondono all'emersione e/o ad una evoluzione sedimentaria caratterizzata dal sollevamento.

generale, la Toscana meridionale (BALDI *et al.*, questo volume). Questo flusso termico, che è connesso alla forte estensione che attualmente interessa il versante occidentale dell'Appennino settentrionale (MONGELLI *et al.*, 1989; CARMIGNANI *et al.*, 1994a), potrebbe inoltre giustificare il sollevamento che caratterizza la fascia centrale della Toscana meridionale e che è messo in evidenza dalle quote raggiunte dai terrazzi fluviali e dal fatto che i fiumi incidono le loro stesse alluvioni.

Fenomeni di sollevamento hanno anche caratterizzato l'evoluzione sedimentaria mio-pliocenica dei principali bacini toscani: episodi lacustri o superfici di erosione testimoniano sollevamenti fino all'emersione di intere zone della Toscana meridionale, come documentato da studi micro-paleontologici e paleo-ambientali (BOSSIO *et al.* 1993, *cum bibl.*). Episodi precursori che annunciano questo fenomeno sono gli olistostromi e/o i depositi legati a flussi gravitativi che interrompono la sedimentazione

pelagica durante il Miocene superiore (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978; MARTINI & SAGRI, 1993; BOSSIO *et al.*, 1993, *cum bibl.*) e durante il Pliocene inferiore (MARTINI & SAGRI, 1993; BOSSIO *et al.*, 1993, *cum bibl.*; LIOTTA & SALVATORINI, questo volume).

I principali episodi di emersione hanno dato origine alle discordanze angolari riconoscibili fra i sedimenti del Messiniano superiore e del Pliocene inferiore e fra i sedimenti del Pliocene inferiore e medio.

In fig. 8 gli episodi di approfondimento, sollevamento ed emersione dei Bacini della Toscana meridionale sono confrontati con l'età dei corpi magmatici della Toscana meridionale e del Tirreno settentrionale (FERRARA & TONARINI, 1985; SERRI *et al.*, 1991): da questo confronto appare con buona evidenza che la messa in posto dei corpi magmatici, verosimilmente indicativa di un riscaldamento litosferico, è contemporanea agli episodi di sollevamento ed emersione.

In questo quadro di generale riscaldamento della litosfera è possibile ritenere che anche il livello di scollamento delle filladi paleozoiche, pur trovandosi a piccola profondità (attualmente circa 1km) corrispondesse, durante l'evento distensivo compreso fra il Langhiano ed il Messiniano superiore, al passaggio fragile/duttile.

In questa ipotesi, si assiste, nella Toscana meridionale, ad una migrazione relativa del passaggio reologico dal dominio fragile al dominio duttile, verso livelli strutturali più profondi, a partire dall'Aquitano; tale migrazione è strettamente connessa ai processi legati allo sviluppo della tettonica distensiva post-collisionale (aumento del grado di estensione, elevato flusso di calore e processo di sollevamento della crosta).

## 6. CONCLUSIONI

Nel quadro della evoluzione post-collisionale della Toscana meridionale, possono essere sottolineati due aspetti principali: il primo, riguarda la posizione delle superfici di scollamento, in corrispondenza del passaggio di stato reologico, che, al proseguire del sollevamento, interessa livelli crostali strutturalmente sempre più profondi; il secondo, riguarda l'importanza della variazione di flusso di calore. Questi due aspetti trovano un comune quadro di riferimento nella tettonica distensiva che ha interessato la litosfera precedentemente ispessitasi durante l'orogenesi dell'Appennino settentrionale. Il processo di dissipazione della radice sialica ha verosimilmente causato un avvicinamento della astenosfera alla superficie e quindi un aumento del flusso termico regionale; questo fatto ha determinato, nel corso della evoluzione della tettonica distensiva, la messa in posto di corpi magmatici derivanti in maggioranza da fusione parziale della crosta e/o del mantello superiore.

L'aumento del flusso termico ha infine favorito il processo di esumazione e, di conseguenza, la progressiva traslazione verso i livelli strutturali geometricamente sem-

pre più bassi del passaggio reologico dal dominio fragile a quello duttile. Il processo di continuo riscaldamento della litosfera ha verosimilmente conosciuto, durante il Miocene superiore-Pliocene, intervalli di tempo in cui si è verificato un parziale riequilibrio termico determinando così fenomeni di subsidenza termica: un esempio di tale condizione potrebbe essere riconosciuto nello sviluppo del secondo ciclo pliocenico che è caratterizzato da una facies sedimentaria tipica di acque poco profonde.

Lavoro con il contributo finanziario del C.N.R. n° 90.00822 (responsabile Prof. A.Lazzarotto)

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BALDI P., BELLANI S., CECCARELLI A., FIORELISI A., SQUARCI P. & TAFFI L. (1994) - *Correlazioni tra le anomalie termiche ed altri elementi geofisici e strutturali della Toscana meridionale*. Questo volume

BARTOLINI C., BERNINI M., CARLONI G.C., COSTANTINI A., FEDERICI P.B., GASPERI G., LAZZAROTTO A., MARCHETTI G., MAZZANTI R., PAPANI G., PRANZINI G., RAU A., SANDRELLI F., VERCESI P.L., CASTALDINI D. & FRANCAVILLA F. (1983) - *Carta neotettonica dell'Appennino settentrionale. Note illustrative*. Boll. Soc. Geol. It., **101** (1982), 523-549

BATINI F., BERTINI G., GIANNELLI G., PANDELI E., PUXEDDU M. & VILLA I. (1985) - *Deep structure, age and evolution of the Larderello-Travale geothermal field*. Geothermal Res., Comm. Trans., **9**, 1-7

BATINI F., BERTINI G., GIANNELLI G., PANDELI E. & PUXEDDU M. (1983) - *Deep structure of the Larderello geothermal field: contribution from recent geophysical and geological data*. Mem.Soc.Geol.It., **5**, 219-235

BERNINI M., BOCCALETTI M., MORATTI G., PAPANI G., SANI F. & TORELLI L. (1990) - *Eventi compressivi neogenico-quadernari nell'area estensionale tirrenica nord-orientale. Dati in mare ed a terra*. Mem.Soc.Geol.It., **45**, 577-589

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 fra i monti di Campiglia e Rapolano Terme (Toscana meridionale): stato attuale delle conoscenze e problematiche*. St.Geol.Camerti, **1**, 155-178

BOCCALETTI M., CERRINA FERONI A., MARTINELLI P., MORATTI G., PLESI G. & SANI F. (1992) - *Late Miocene-Quaternary compressive events in the Tyrrhenian side of the Northern Apennines*. Annale Tectonicae, **IV** (2), 214-230

BONINI M., CERRINA FERONI A., MARTINELLI P., MORATTI G. & VALLERI G. (1992) - *La discordanza intramessiniana nell'ambito della sinclinale di Radicondoli (SI): dati strutturali e biostratigrafici preliminari*. 76° Congresso Soc.Geol.It., Firenze 1992, Volume dei riassunti, 220-221

- BOSSIO A., COSTANTINI A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1993) - *Rassegna delle conoscenze sulla stratigrafia del neautoctono toscano*. Mem.Soc.Geol.It., **49**, 17-98
- BOSSIO A., ESTEBAN M., GIANNELLI L., LONGINELLI A., MAZZANTI R., MAZZEI R., RICCI LUCCHI F. & SALVATORINI G. (1978) - *Some aspects of the Upper Miocene in Tuscany*. In: Messinian Seminar n° 4, I.G.C.P., Project n°96, 1-88
- BOSSIO A., GIANNELLI L., MAZZANTI R. & SALVATORINI G. (1981) - *Gli strati alti del Messiniano, il passaggio Miocene-Pliocene e la sezione Plio-Pleistocenica di Nugola nelle colline a NE dei Monti Livornesi*. In: "IX convegno Soc. Paleont. It.", Pisa, 1981, 55-90
- BOSSIO A., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1991a) - *Il Pliocene dell'area di Pomarance (Pisa)*. Atti Soc.Tosc.Nat.Mem., Serie A, **98**, 1-98
- BOSSIO A., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1991b) - *Il Pliocene di S.Dalmazio-Anqua e Radicondoli-Belforte (Siena)*. Atti Soc.Tosc.Sc.Nat., Mem, Serie A, **98**, 99-191
- CARMIGNANI L., DECANDIA F.A., DISPERATI L., FANTOZZI P.L., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. & OGGIANO G. (1994a) - *Relationships between the Sardinia-Corsica-Provençal Domain and the Northern Apennines*. Terranova (in stampa)
- CARMIGNANI L., DECANDIA F.A., FANTOZZI P.L., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. & MECCHERI M. (1994b) - *Tertiary extensional tectonics in Tuscany (Northern Apennines, Italy)*. Tectonophysics (in stampa).
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990) - *Crustal extension in the northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*. Tectonics, **9/6**, 1275-1303.
- COSTANTINI A., DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A. & SANDRELLI F. (1988) - *L'Unità di Monticiano-Roccastrada fra la Montagnola senese ed il Monte Leoni (Toscana meridionale)*. Atti Ticinesi Sc. Terra, **31** (1987/1988), 382-340.
- DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A. & LIOTTA D. (1993) - *La "serie ridotta" nel quadro dell'evoluzione della Toscana meridionale*. Mem.Soc.Geol.It., **49**, 181-191
- DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., SPALLONE S. & STEA B. (1992) - *Struttura del nucleo mesozoico terziario di Castell'Azzara*. 76° Congresso Soc.Geol.It., Firenze 1992, Volume dei riassunti, 234
- ELTER F.M. & PANDELI E. (1990) - *Alpine and Hercynian orogenic phases in the basement rocks of the Northern Apennines (Larderello geothermal field, Southern Tuscany, Italy)*. Ecl. Geol. Helv, **83** (2), 241-264
- FERRARA G. & TONARINI S. (1985) - *Radiometric geochronology in Tuscany: results and problems*. Rend. Soc. Mineral. e Petrol., **40**, 111-124
- LAZZAROTTO A. (1967) - *Geologia della zona compresa fra l'alta Valle del Fiume Cornia ed il Torrente Pavone (Prov. di Pisa e Grosseto)*. Mem. Soc. Geol. It., **6** (2), 151-197
- LAZZAROTTO A. & MAZZANTI R. (1978) - *Geologia dell'alta Val di Cecina*. Boll. Soc. Geol. It., **95**, (6), (1976), 1365-1487
- LAZZAROTTO A. & SANDRELLI F. (1979) - *Stratigrafia ed assetto tettonico delle formazioni neogeniche del bacino del Casino (Siena)*. Boll. Soc. Geol. It., **96**, (5/6), (1977), 747-762
- LIOTTA D. & SALVATORINI G. (1994) - *Evoluzione sedimentaria e tettonica della parte centro-meridionale del Bacino pliocenico di Radicondoli*. Questo volume
- MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993) - *Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy*. Earth-Science Reviews, **34**, 197-233
- MONGELLI F., ZITO G., CIARANFI N. AND PIERI P. (1989) - *Interpretation of heat flow density of the Apennine chain, Italy*. Tectonophysics, **164**, 267-280
- NICOLICH R. & MARCHETTI A. (1982) - *Profili sismici*. In: "Il Graben di Siena" - CNR-Progetto Finalizzato Energetico Rapporto Finale, **9**, Pisa, 137-149
- SERRI G., INNOCENTI F., MANETTI P., TONARINI S. & FERRARA G. (1991) - *Il magmatismo Neogenico-Quaternario dell'area Tosco-Laziale-Umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale*. Studi geol. Camerti, **1**, 429-463
- VILLA I., GIANNELLI G., PUXEDDU M., BERTINI G. & PANDELI E. (1987) - *Granitic dikes of 3,8 Ma. age from a 3,5 km deep geothermal well at Larderello (Italy)*. In: "Granite and their surroundings", Soc. It. Min. Petr., **42**, 364.

