

I TRAVERTINI DELLE TERME DI S.GIOVANNI (RAPOLANO TERME, APPENNINO SETTENTRIONALE) E LORO IMPLICAZIONE NEOTETTONICA

Andrea Brogi^{1*}, Enrico Capezzuoli¹, Anna Gandin¹

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Siena, Via Laterina, 8. 53100 Siena;

*Corresponding author: e-mail: brogiandrea@unisi.it; tel. 0577233972; fax: 0577233938

RIASSUNTO: A. Brogi, E. Capezzuoli & A. Gandin, *I travertini delle Terme di S.Giovanni (Rapolano Terme, Appennino Settentrionale) e loro implicazione neotettonica* (IT ISSN 0394-3356, 2007).

Lo studio dei travertini affioranti nell'area di S.Giovanni (Rapolano Terme) e dell'assetto geologico dell'area ha permesso di riconoscere un importante controllo tettonico, durante il Quaternario, nella deposizione di queste rocce calcaree. Esse sono state depositate intorno a sorgenti termali attive in periodi diversi, a partire da 24 ± 3 ka. Attualmente la deposizione del travertino è molto scarsa ed è collegata a sorgenti di modesta portata a causa della captazione delle acque nello stabilimento termale. Il deposito di travertino raggiunge il suo massimo spessore (25 metri) nell'area archeologica di Campo Muri, dove anche oggi è attiva una cava per il reperimento di travertino per uso ornamentale. La deposizione dei travertini più antichi sembra derivare da una o più sorgenti, in coincidenza della mofeta del Bossoleto, una dolina a pianta circolare dal diametro di circa 80m dalla quale fuoriesce solo abbondante CO₂ unitamente ad altri gas velenosi. Tale sorgente era collocata sulla superficie di un terrazzo fluviale collegato con l'evoluzione idrografica del fiume Ombrone. L'attività sorgiva ha permesso la deposizione di calcare che ha ricoperto, in parte, i depositi fluviali e quelli che costituivano il loro substrato, rappresentato dai sedimenti marini limoso-argillosi del Pliocene medio. I depositi pliocenici e quelli alluvionali quaternari, così come i travertini che li ricoprono, sono dislocati, per una decina di metri al massimo, da una faglia diretta orientata in direzione ONO-ESE. Una serie di piccole sorgenti allineate lungo un tratto della faglia ha dato origine ad un elemento morfo-tettonico (*fissure-ridge*), lungo circa 250 metri, a seguito della deposizione di travertino. La faglia, sicuramente più recente di 24 ± 3 ka, età più antica dei travertini dislocati, può essere ritenuta potenzialmente attiva anche oggi per due motivi: a) vi è una evidente attività idrotermale che indica la presenza di fratture beanti non ancora ostruite da minerali di neoformazione; b) i travertini depositati nel Marzo 2003 sono stati localmente fessurati e dislocati di qualche millimetro. Queste evidenze non solo hanno importanti implicazioni di carattere neotettonico per l'area di Rapolano Terme e per il margine orientale del Bacino di Siena, ma sono indicative anche dell'esistenza di probabili faglie attive e dunque potenzialmente sismogenetiche.

ABSTRACT: A. Brogi, E. Capezzuoli & A. Gandin, *Travertines at Terme San Giovanni (Rapolano Terme, Northern Apennines) and their neotectonic implications*. (IT ISSN 0394-3356, 2007).

The travertines cropping out in the S.Giovanni Terme area (Rapolano Terme) were deposited from thermal springs with different ages, active from 24 ± 3 ka. Presently, the travertine deposition scarcely occurs. It is related to thermal springs with scarce flow due to the hot water pumped by the thermal resort. The travertines are better exposed in the Campo Muri archaeological area where they are exposed up to 25m in thickness. Here a quarry is presently active. The most ancient travertines were deposited from thermal springs, presently inactive, and coinciding with the Bossoleto mofet. This is a circular doline with diameter of about 80m, from which the CO₂ and other poisonous gas rise up. This thermal spring was located on a fluvial terrace developed together with the hydrological evolution of the Ombrone river. The travertine deposited from these thermal springs overlies on the alluvial deposits and bedrock here represented by the Middle Pliocene marine clays. These sediments and the alluvial deposits, as well as the travertines, were dissected by a normal fault, WNW-ESE striking, characterised by about 10 meters of displacement. Along the trace of this fault a travertine fissure-ridge, about 250 meters long, developed. The fault, younger than 24 ± 3 ka, could be considered as presently active for the reason that: a) a widespread hydrothermal activity is concentrated along the trace of the fault, suggesting open fractures within the damage zone; b) the travertines deposited in March 2003 were fissured and displaced of some millimetres. A parallel normal fault has been recognised North of the travertine fissure-ridge. Its kinematics has been inferred in Jurassic rocks affected by the fault. Fault activity controlled hydrothermal circulation, as attested by three main thermal springs presently inactive, aligned along the fault trace, and related travertine deposits. Faults produced upwelling of hydrothermal fluids which show peculiar geochemical features with respect to all the fluids flowing from all the thermal springs occurring in the Rapolano area and surroundings. This is indicative for a different fluid pathway which can be explained considering the structural setting and the deeply occurrence of a structural high formed by carbonate rocks coinciding with an overturned and detached anticline. This structural high represents a reservoir supplied by fluids migrating along the detachment surface of the fold and thus with a different provenance. All these evidences, symptomatic of active faulting, indicate neotectonics in the Rapolano Terme area and the eastern side of the Siena Basin.

Parole chiave: Neotettonica, dorsale di travertino, circolazione di fluidi, sorgenti termali, Appennino Settentrionale.

Keywords: Neotectonics, travertine fissure-ridge, fluid flow, hot-springs, Northern Apennines.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni lo studio dei depositi carbonatici ed in particolare dei travertini ha subito un importante incremento, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie d'indagine ed all'acquisizione di

nuove metodologie di studio. La geochimica isotopica, per esempio, applicata ai depositi di travertino può fornire informazioni sul paleoclima, sulla origine e provenienza delle acque termominerali da cui hanno avuto origine, sul loro percorso di risalita e sui processi di interazione del fluido con le rocce attraversate (LIVNAT &

KRONFELD, 1985; JANSSEN *et al.*, 1999; KHARAKA *et al.*, 2000; MINISSALE *et al.* 2000, 2002a, 2002b, MARTIN-ALGARRA *et al.*, 2003; DU *et al.*, 2005). Da pochi anni a questa parte, tuttavia, i travertini collegati alle sorgenti termominerali sono considerati anche ottimi elementi per studi di natura tettonica, principalmente riguardanti l'attività di faglie distensive o trascorrenti (HANCOCK *et al.*, 1999; ALTUNEL, 2005). Infatti, proprio per la loro natura, i travertini si depositano in prossimità di sorgenti termali strettamente collegate con la presenza di fratture nel substrato, attraverso le quali i fluidi idrotermali possono risalire verso la superficie (CUREWITZ & KARSON, 1997; HANCOCK *et al.*, 1999 *cum bibl.*). Tali fratture, infatti, sviluppate in risposta a sollecitazioni tettoniche, danno luogo ad una permeabilità secondaria che può permettere la circolazione di fluidi in aree caratterizzate da un gradiente geotermico anomalo e quindi favorire la loro emergenza in superficie. Tuttavia, l'alto potere incrostante delle acque termominerali in circolazione, se sovrassature, può causare, in breve tempo, il riempimento e l'occlusione delle fratture mediante la deposizione di minerali di neoformazione (*self-sealing*) (BRUHN *et al.*, 1990). Ne consegue che la circolazione idrotermale può manifestarsi durante periodi relativamente brevi, la cui durata è funzione della salinità dei fluidi. Inoltre, anche l'attività tettonica gioca un ruolo fondamentale per la durata dei sistemi idrotermali. Le continue sollecitazioni dovute all'attività prolungata nel tempo delle faglie, così come la sismicità ad esse collegate, possono garantire la continuità di ampliamento di fratture beanti, favorendo la circolazione idrotermale anche per lunghi periodi. Per questo motivo idrotermalismo ed attività tettonica costituiscono un binomio inscindibile (ALTUNEL & HANCOCK, 1993a; CUREWITZ & KARSON, 1997; HANCOCK *et al.*, 1999; ALTUNEL, 2005). Ne consegue che i travertini collegati alle sorgenti termali costituiscono ottimi indicatori tettonici e la loro età di deposizione diviene indicativa per quella dell'attività tettonica (HANCOCK *et al.*, 1999; ALTUNEL, 2005). L'analisi morfologica dei travertini, così come la loro collocazione, possono insieme fornire importanti informazioni anche sulla geometria e cinematica delle faglie. Numerosi studi (ALTUNEL & HANCOCK, 1993a, 1993b; ÇAKIR, 1999; HANCOCK *et al.*, 1999; ATABEY 2002) condotti in varie parti del mondo, infatti, hanno messo in evidenza come le sorgenti idrotermali siano collocate lungo tratti ben precisi di faglie o fratture ad esse associate, e come la loro collocazione rispetto alle strutture possa fornire importanti informazioni sulla cinematica delle faglie (Fig. 1). Le *travertine fissure-ridge* (HANCOCK *et al.*, 1999), in particolare, sono elementi morfo-strutturali collegati alla deposizione del travertino che possono fornire molteplici informazioni di carattere strutturale. Esse, infatti, sono collegate

a sorgenti idrotermali allineate lungo una frattura, che consentono la deposizione di travertino con geometria centrifuga rispetto alla zona di emergenza. La progressiva deposizione di travertino porta alla formazione di un rilievo (*ridge*), generalmente simmetrico, che può raggiungere la lunghezza di svariate centinaia di metri, la larghezza di qualche decina di metri e l'altezza di 10-20 metri. Sulla sommità di tale rilievo è presente una fessura più o meno larga (fino a qualche metro), che coincide precisamente con la frattura del substrato lungo la quale risalgono le acque termali. In varie parti del mondo (Turchia, USA, Kenya ecc...) sono descritte *travertine fissure-ridge* fossili, cioè strutture in corrispondenza delle quali non avviene più circolazione e quindi deposizione di travertino. Tali strutture testimoniano una attività idrotermale avvenuta in passato ed il loro studio può contribuire alla ricostruzione dell'assetto tettonico ed idrogeologico da cui hanno avuto origine. Esempi di *fissure-ridge* attive, invece, sono molto rari e di notevole importanza perché la loro presenza può indicare l'attività di faglie e quindi l'esistenza di strutture potenzialmente attive.

In questo lavoro vengono descritte le facies deposizionali e le implicazioni tettoniche dei travertini presenti nell'area termale di S.Giovanni, presso Rapolano Terme (Fig. 2), ed in particolare un esempio di dorsale (*travertine fissure-ridge*) attiva. Tale struttura, descritta da vari autori dal punto di vista sedimentologico e geochimico (CIPRIANI *et al.*, 1972; GUO & RIDING, 1992, 1994; 1998; ANDREWS & RIDING, 2001; FOUKE, 2001; MINISSALE *et al.*, 2002a), ha un importante significato strutturale ed implicazioni neotettoniche che permettono di riconsiderare il quadro strutturale del margine orientale del Bacino di Siena, dove tale struttura si colloca, e di porre l'attenzione su un'area che dal punto di vista della pericolosità geologica e del rischio sismico dovrebbe essere presa maggiormente in considerazione.

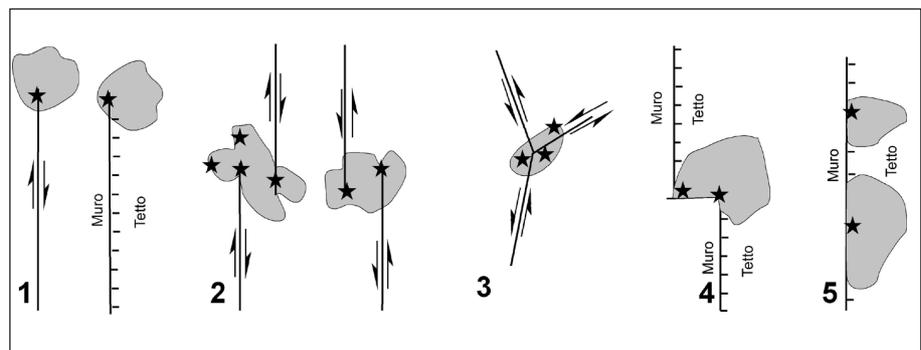


Fig. 1 - Rapporti tra la geometria e cinematica delle faglie e la collocazione di sorgenti termali la cui presenza è dovuta a circolazione idrotermale lungo zone permeabili di faglia. In grigio i depositi di travertino. 1) le sorgenti termali si collocano in corrispondenza della terminazione della faglia (*fault tip*), siano esse trascorrenti o dirette; 2) le sorgenti si collocano in corrispondenza di zone di raccordo tra faglie trascorrenti; 3) le sorgenti termali si collocano in corrispondenza dell'incontro di tre faglie trascorrenti; 4) le sorgenti termali si collocano all'intersezione tra faglie di età diversa; 5) le sorgenti termali si collocano in corrispondenza di alcuni tratti lungo la traccia di una faglia diretta (da CUREWITZ & KARSON, 1997 con modifiche).

Relationships between geometry, kinematics and location of the thermal springs due to the hydrothermal circulation along the fault zones. The grey colour indicated the travertine masses; 1) the thermal springs are located in correspondence of the tip points of both normal and strike slip faults; 2) the thermal springs are located in the relay zones of strike-slip faults; 3) the thermal springs are located at the strike-slip faults intersection; 4) the thermal springs are located where normal faults have been dissected by a new generation of faults; 5) the thermal springs are located along the trace of a normal fault (after CUREWITZ & KARSON, 1997 modified).

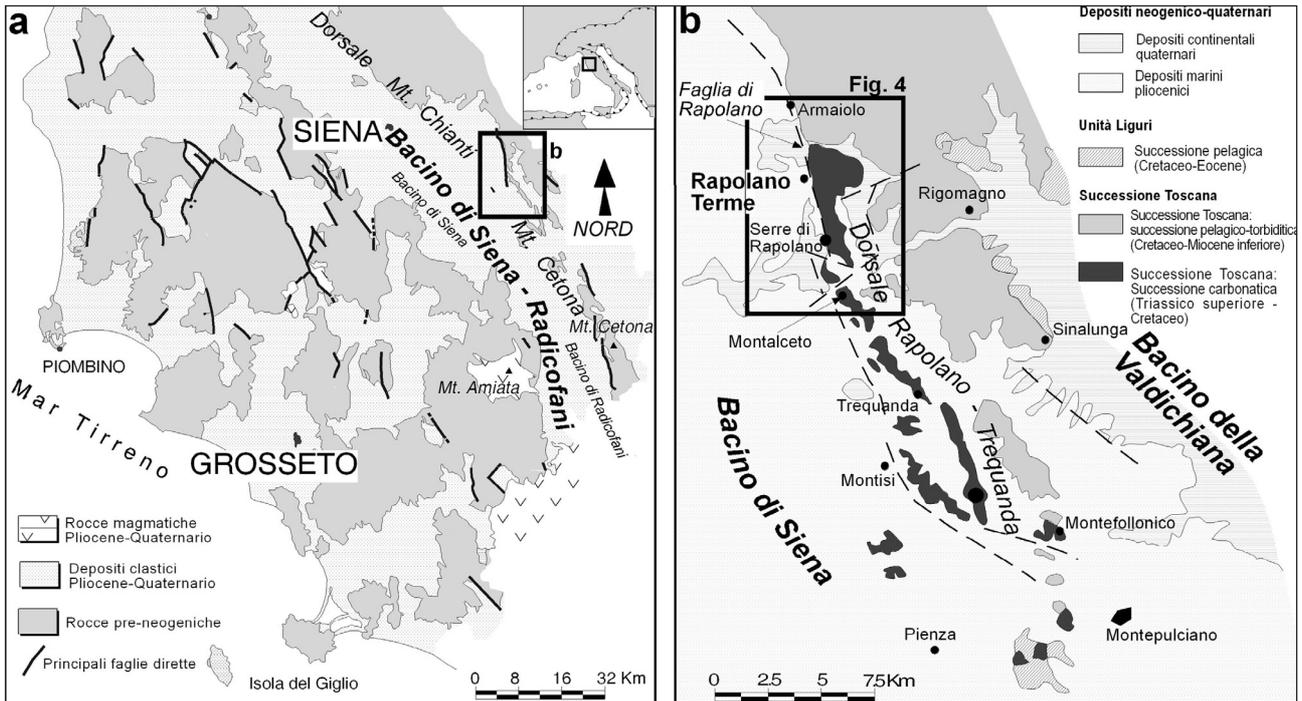


Fig. 2 - a) collocazione dell'area di studio; il rettangolo indica l'area ingrandita in b; b) schema geologico dell'area di Rapolano e della Dorsale di Rapolano-Trequanda. Il rettangolo illustra l'area riportata in Figura 4.

a) location of the study area; the black rectangle indicates the enlarged area in b; b) geological sketch map of the Rapolano area and Rapolano-Trequanda ridge. The black rectangle indicates the enlarged area given in Figure 4.

2. GEOLOGIA DELL'AREA DI RAPOLANO TERME

L'area di Rapolano Terme (Fig. 2) si colloca in un tratto del margine orientale del Bacino neogenico-quadernario di Siena, depressione strutturale (Graben) di Siena; in COSTANTINI *et al.*, 1982) collegata all'attività tettonica distensiva miocenico-pliocenica (MARTINI & SAGRI, 1993). Tale depressione strutturale è stata interpretata da alcuni autori anche come *thrust-top basin* collegato allo sviluppo di thrust crostali attivi fino al Pleistocene (FINETTI *et al.*, 2001; BONINI & SANI, 2002). Tuttavia la maggior parte degli Autori sono concordi nel ritenere che il Bacino di Siena, così come la sua prosecuzione meridionale (Bacino di Radicofani) siano collegati con l'attività tettonica distensiva miocenico-quadernaria (COSTANTINI *et al.*, 1982; BERTINI *et al.*, 1991; BALDI *et al.*, 1994; LIOTTA, 1994, 1996, LIOTTA & SALVATORINI, 1994; MANTOVANI *et al.*, 1995, 1997; DALLMEYER & LIOTTA, 1998; ACOCELLA *et al.*, 2002; BROGI *et al.*, 2005b; PASCUCCI *et al.*, 2005; COLLETTINI *et al.*, 2006; BROGI & LIOTTA, 2006; VITI *et al.*, 2006) come dettagliatamente discusso in BROGI *et al.*, (2005a,b), BROGI (2006) e BROGI & LIOTTA (2006). Il margine orientale di tale bacino è rappresentato da un importante elemento morfo-strutturale, che nell'area di Rapolano è noto in letteratura come dorsale Rapolano-Trequanda (LOSACCO, 1952; LOSACCO & DEL GIUDICE, 1958; LAZZAROTTO, 1973; BROGI *et al.*, 2002). Tale dorsale, a sua volta, costituisce il tratto di una continua struttura positiva, orientata in direzione media NNW-SSE, nota come Dorsale Monti del Chianti - Monte Cetona (BERTINI *et al.*, 1991) (Fig. 2a). Essa è costituita principalmente dalle formazioni appartenenti alla Successione Toscana non metamorfica che, nell'area di Rapolano Terme, è rappresentata da rocce di età

compresa tra il Triassico superiore ed il Miocene inferiore (Calcarei a *Rhaetavicula contorta* - Macigno) (LOSACCO & DEL GIUDICE, 1958; LAZZAROTTO, 1973; COSTANTINI *et al.*, 1982; BROGI *et al.*, 1999; 2002) (Fig. 3). Le rocce appartenenti alla Successione Toscana sono state intensamente deformate durante la tettonogenesi dell'Appennino Settentrionale, ed hanno così registrato le deformazioni collegate con l'intera evoluzione tettonica.

Le rocce affioranti nella dorsale Rapolano-Trequanda sono separate dai depositi di riempimento del Bacino di Siena, principalmente costituiti da argille, sabbie, arenarie, ghiaie e conglomerati di ambiente marino, da una importante faglia diretta immergente verso ovest, orientata circa parallelamente alla dorsale stessa (COSTANTINI *et al.*, 1982; BARAZZUOLI *et al.*, 1991; BROGI *et al.*, 1999). Tale faglia, nota in letteratura come Faglia di Rapolano, è stata attiva fino al Pliocene medio (BROGI, 2002; BROGI *et al.*, 2005c) e risulta, quindi, a tratti sepolta dai depositi più recenti. Ne consegue che la sua traccia in superficie è di difficile localizzazione, sebbene l'allineamento di sorgenti di acque termali e gas ne permettano l'individuazione (BROGI *et al.*, 1999) (Fig. 4). I depositi continentali di età pleistocenica ed olocenica sono rappresentati da ghiaie, sabbie e limi lacustri e fluvio-lacustri a cui sono associate placche di travertino con le quali mostrano rapporti eteropici. Nel loro insieme, i depositi continentali quadernari ricoprono sia i depositi neogenici marini sia le rocce della Successione Toscana.

2.1 - I travertini dell'area di Rapolano

I travertini presenti nell'area di Rapolano Terme costituiscono estesi affioramenti che ricoprono un'area

di circa 14 Km² sotto forma di placche isolate, collocate principalmente lungo la traccia della Faglia di Rapolano (BROGI *et al.*, 1999) (Fig. 4). In altri casi, affioramenti ridotti di travertino sono localizzati in prossimità di faglie minori. Le placche più estese e spesse compaiono nell'area di Serre di Rapolano e sono ancora oggi interessate da una intensa attività estrattiva finalizzata principalmente al reperimento di travertino come pietra ornamentale. L'attività estrattiva del travertino nell'area in esame è attestata almeno dal periodo etrusco. Il processo di estrazione, notevolmente intensificato negli ultimi decenni e realizzato mediante tagli effettuati con il filo elicoidale e diamantato, ha permesso l'esposizione di ampi fronti di cava che mettono in evidenza la sovrapposizione di diverse generazioni di episodi deposizionali di travertino che formano corpi complessi, caratterizzati da discordanze talvolta angolari e spesso separati da paleosuoli e/o colluvi fino a qualche metro di spessore (Fig. 5).

I diversi eventi deposizionali, caratterizzati da facies che denotano ambienti di sedimentazione differenti, suggeriscono la presenza di numerose sorgenti associate a bacini palustri isolati, da esse alimentate. Le litofacies che costituiscono questi corpi sedimentari, assai variabili da luogo a luogo, sono state descritte nei lavori di CIPRIANI *et al.* (1972), GUO & RIDING (1992), (1994), (1998), (1999) ai quali si rimanda per un maggior approfondimento. Tuttavia, sui travertini di Rapolano manca ancora uno studio stratigrafico paleoambientale/paleogeografico e dati cronostratigrafici completi. Recenti lavori di geocronologia effettuati su alcuni intervalli relativi ai depositi affioranti nella cava attiva, collocata nell'area archeologica di Campo Muri (nord dell'area termale di S.Giovanni), hanno permesso di riferire al Pleistocene superiore-Olocene (24±3 Ka – attuale, CARRARA *et al.*, 1998). Tuttavia l'età dell'insieme dei depositi rimane incerta. Più generalmente tutti i travertini presenti nell'area di Rapolano sono stati riferiti al Pleistocene-Olocene sulla base di studi macropaleontologici basati su conchiglie di gasteropodi polmonati, ossa di mammiferi e soprattutto filliti, rinvenute in modo sporadico in cave differenti. L'età quaternaria dei travertini, comunque, è indicativa di tettonica recente che avrebbe caratterizzato l'area di Rapolano e quindi il margine orientale del Bacino di Siena (BROGI *et al.*, 2005a). Le relazioni tra le strutture distensive ed i depositi di travertino nell'area di Rapolano sono state descritte in recenti lavori (BROGI, 2002; 2004) che sottolineano come i depositi di travertino siano principalmente collocati all'intersezione di faglie con prevalente movimento verticale, attive durante il Quaternario, con la Faglia di Rapolano, più vecchia ed orientata circa ortogonalmente rispetto alle prime (Fig. 4).

3. I TRAVERTINI DI CAMPO MURI E DELL'AREA TERMALE DI S.GIOVANNI

Campo Muri è una importante località archeologica collocata qualche centinaio di metri a nord dello stabilimento termale di S.Giovanni (Fig. 6). Presso Campo Muri l'attività estrattiva del travertino ha riportato alla luce un insediamento di epoca etrusco-romana (LECCHINI & MAZZINI, 1986) (III Sec. a.C – IV Sec. d.C.) sviluppatosi attorno ad emergenze termali, rappresentate per lo

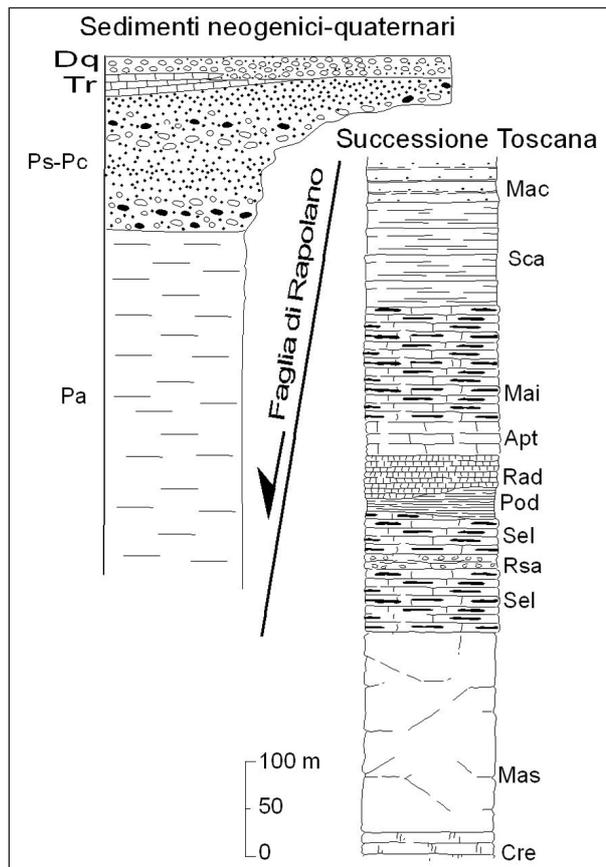


Fig. 3 - Rapporti tettono-stratigrafici tra i depositi neogenico-quaternari e la Successione Toscana. Sigle: Dq – depositi continentali quaternari; Tr – travertini; Ps-Pc – Sabbie e conglomerati marini del Pliocene inferiore-medio; Pa – Argille e argille sabbiose del Pliocene inferiore-medio; Mac – Macigno; Sca – Scaglia Toscana; Mai – Maiolica; Apt – Calcare ad Aptici; Rad – Diaspri; Pod – Marne a Posidonomya; Sel – Calcare Selcifero; Rsa – Calcare Rosso ammonitico; Mas – Calcare Massiccio; Cre – Calcare a *Rhaetavicula contorta*.

*Relationships between the Neogene-Quaternary deposits and the Tuscan Nappe. Symbols: Dq – Quaternary continental deposits; Tr – travertines; Ps-Pc – Early-Middle Pliocene marine sands and conglomerates; Pa – Early-Middle Pliocene clays and sandy clays; Mac – Macigno Fm; Sca – Scaglia Toscana Fm; Mai – Maiolica Fm; Apt – Calcare ad Aptici Fm; Rad – Diaspri Fm; Pod – Marne a Posidonomya Fm; Sel – Calcare Selcifero Fm; Rsa – Calcare Rosso ammonitico Fm; Mas – Calcare Massiccio; Cre – Calcare a *Rhaetavicula contorta*.*

più da una sorgente (Buca delle Fate) oggi non più attiva (a in Figura 6), venerata ed utilizzata per scopi ludici e terapeutici.

La cava di Campo Muri offre una buona opportunità per lo studio dei rapporti geometrici e cronologici dei corpi travertinosi presenti in quest'area. L'attività estrattiva interessa un deposito di travertino spesso fino a circa 25 metri che costituisce il riempimento di una valle orientata in direzione NO-SE (CARRARA *et al.*, 1998), coincidente circa con l'attuale corso del Fosso Nibbiaia (Fig. 6). Le sorgenti termali che hanno permesso la deposizione dei travertini più antichi osservabili in cava sembra fossero collocate in corrispondenza degli attuali stabilimenti termali di S.Giovanni Terme. In parti-

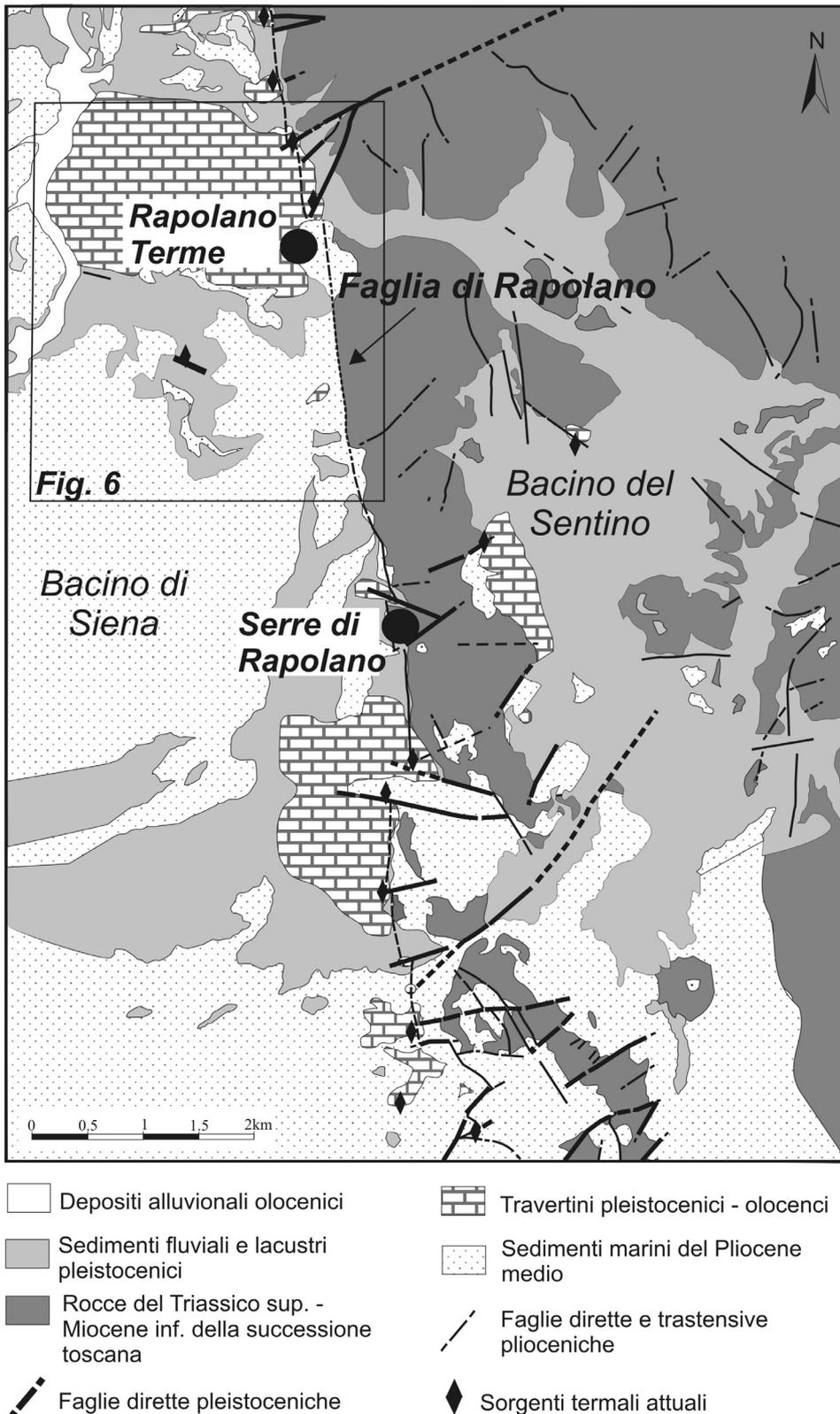


Fig. 4 - Schema geologico dell'area di Rapolano; i principali depositi di travertino e le attuali sorgenti termali si collocano lungo la traccia della Faglia di Rapolano laddove questa è stata dislocata da faglie circa ortogonali, di età quaternaria (da BROGI, 2004).

Geological sketch map of the Rapolano area; the travertine deposits and the present thermal springs are located along the Rapolano Fault where this latter has been dissected by Quaternary, near orthogonal faults (from BROGI, 2004).

colare, è possibile ipotizzare, con buona approssimazione, che la sorgente più importante coincidesse con l'attuale mofeta del Bossoleto, situata in una dolina dal diametro di circa 80m e profonda 10m, dalla quale fuoriesce abbondante CO₂ (99%) unitamente ad altri gas venefici (1%) (H₂S e SO₂) (VAN GARDINGEN *et al.*, 1997). La mofeta del Bossoleto, infatti, si trova nella parte morfologicamente più elevata dell'area suggerendo che quella doveva essere l'area sorgente delle acque termali. Questa ipotesi è confermata anche dalla giacitura degli strati di travertino che sono inclinati con disposizione centrifuga rispetto alla mofeta ed in particolar modo immergono verso le aree morfologicamente depresse di Campo Muri (verso nord), dove scorre il Fosso Nibbiaia, ed il Borro di Canatoppa (verso sud) (Fig. 6). La mofeta del Bossoleto è collocata su di un terrazzo fluviale sviluppato a seguito dell'evoluzione idrografica del Fiume Ombrone che scorre pochi chilometri ad ovest di questa area (Fig. 6). Tale terrazzo costituisce una superficie morfologicamente piatta, collocata alla quota media di 280 metri sul livello del mare. Essa è costituita da depositi fluviali principalmente limoso-sabbiosi a cui s'intercalano livelli di calcari incrostanti (Fig. 7) che, nell'area delle Terme di S.Giovanni raggiungono lo spessore di 15-20 metri. Tali depositi poggiano direttamente sulle argille marine del Pliocene medio del Bacino di Siena. Le manifestazioni termali collegate con l'antica sorgente del Bossoleto hanno permesso la deposizione di travertino che ha ricoperto parzialmente la superficie terrazzata (Fig. 6). Allo stesso tempo, la presenza delle due valli orientate in direzione NO-SE, attualmente

coincidenti con quella del Fosso di Nibbiaia e del Fosso di Canatoppa, hanno influito notevolmente sul deflusso delle acque e sulla conseguente deposizione del travertino. Questo ultimo, infatti, ha riempito quasi totalmente la paleovalle del Fosso di Nibbiaia ed in parte quella del Borro di Canatoppa.

L'evoluzione paleogeografica e paleoambientale dei travertini presenti nell'area delle Terme di S.Giovanni è stata dettagliatamente ricostruita da CARRARA *et al.* (1998) sulla base di osservazioni effettuate nei fronti della cava di Campo Muri. La sezione studiata da CARRARA *et al.* (1988), ben esposta nel margine occidentale della cava (Fig. 8), è collocata nel punto più spesso del deposito di travertino ed ha permesso, così, l'analisi di tutti gli eventi deposizionali qui presenti. La successione carbonatica risulta discontinua, poichè nei fronti di cava si riconoscono diversi livelli calcarei separati da paleosuoli e colluvi indicativi di periodi di stasi dell'attività deposizionale dei travertini. Lo studio geocronologico basato su datazioni $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ e sugli isotopi del carbonio ha permesso di attribuire un'età di 24 ± 3 ka ai depositi di travertino più antichi affioranti. Tali travertini, tuttavia, costituiscono il punto più basso esposto nella cava, ma non costituiscono la base del giacimento che si trova a pochi metri sotto al piano di cava. Le datazioni effettuate da CARRARA *et al.* (1998), infatti, hanno messo in evidenza un intervallo di tempo piuttosto lungo ($24 \pm 3 - 9 \pm 1.7$ ka) caratterizzato da una sedimentazione sub-aerea, sostanzialmente continua, che avrebbe permesso la deposizione della massa più importante di travertino (tr.d.A1 in Figura 8). A questo episodio sarebbe seguito un evento erosivo, perdurato qualche migliaia di anni, testimoniato da una intensa brecciatura dei livelli di travertino più superficiali. Ad esso è seguito nuovamente la deposizione di travertino (tr.d.A2 in Figura 8) in un periodo di tempo, compreso tra 6.7 ± 1.4 e 3.24 ± 0.55 ka, caratterizzato da un evento alluvionale molto importante che ha causato la deposizione, nella parte alta, di uno spessore di qualche

metro di sedimenti alluvionali. La deposizione di travertino è continuata, poi, ininterrottamente fino al III Sec. a.C. - IV Sec. d.C., periodo al quale vengono riferiti i reperti di un insediamento etrusco-romano presente



Fig. 5 - Le pareti tagliate a filo elicoidale delle numerose cave presenti nell'area di Rapolano permettono di riconoscere l'architettura dei depositi di travertino. Si riconoscono diversi episodi deposizionali separati da discordanze angolari e da depositi colluviali e paleosuoli.

The quarry fresh-cuts occurring in the Rapolano area allow to recognise the internal architecture of the travertine deposits. We can recognise different depositional episodes separated by angular unconformities, colluvial deposits and paleosols.

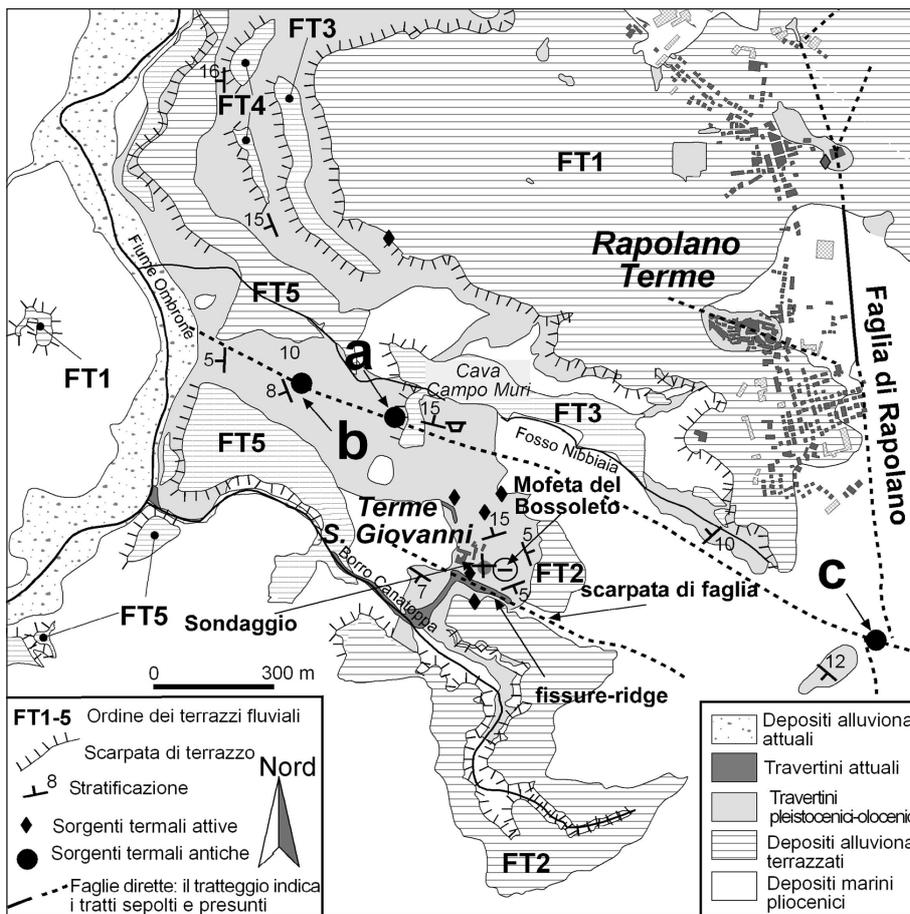


Fig. 6 - Schema geomorfologico dell'area delle Terme di S.Giovanni. Il significato di a, b e c è riportato nel testo.

Geomorphologic sketch of the Terme S.Giovanni area. a, b and c points are discussed in the text.

nell'area (LECCHINI & MAZZINI, 1986). In questa fase il flusso delle acque era regimentato per uso termale e la deposizione del travertino fu quindi interrotta. Tali reperti, tuttavia, furono in parte ricoperti da travertino a seguito dell'abbandono del sito, a testimonianza di una attività termale prolungata nel tempo (Fig. 9A). Durante il periodo dell'insediamento etrusco-romano, abbiamo testimonianze dell'attività di una sorgente collocata in prossimità del sito (Buca della Fate, a in Figura 6), la quale potrebbe aver contribuito alla deposizione dell'ultimo livello di travertino riconoscibile in cava che, per altro, ha una giacitura orizzontale. Naturalmente non abbiamo la possibilità di escludere la concomitante attività della sorgente collocata in corrispondenza dell'attuale mofeta del Bossoleto.

Collegata con la sorgente della Buca delle Fate vi è una complessa rete di canali di travertino autocostruiti (*self-built channel*, VIOLANTE *et al.*, 1994) conseguenti al deflusso delle acque sorgive verso il Fiume

Ombrone. Tali canali raggiungono l'altezza massima di 6 metri e sono riconoscibili per una lunghezza di 150 metri (Figs 9B e 9C). Lungo alcuni tratti del canale più importante, laddove esso raggiunge la maggiore larghezza ed altezza, sono stati effettuati, probabilmente durante il periodo dell'insediamento di Campo Muri, alcuni tagli per il reperimento di materiale da costruzione. L'antichità di questa attività estrattiva è confermata dall'alterazione delle pareti tagliate, nonché dalla metodologia con cui sono stati realizzati gli scavi stessi, sostanzialmente effettuati mediante percussione come dimostrano le tracce lasciate in alcuni tratti delle pareti.

Sulla base dell'età più antica dei travertini di Campo Muri si può ritenere che l'inizio dell'attività sorgiva della sorgente del Bossoleto risalga a 24 ± 3 ka. Ne consegue che questa età possa coincidere con quella più antica dei travertini presenti nelle aree circostanti alla sorgente e che corrisponderebbe a quella dei depositi calcarei collocati sul terrazzo fluviale sul quale

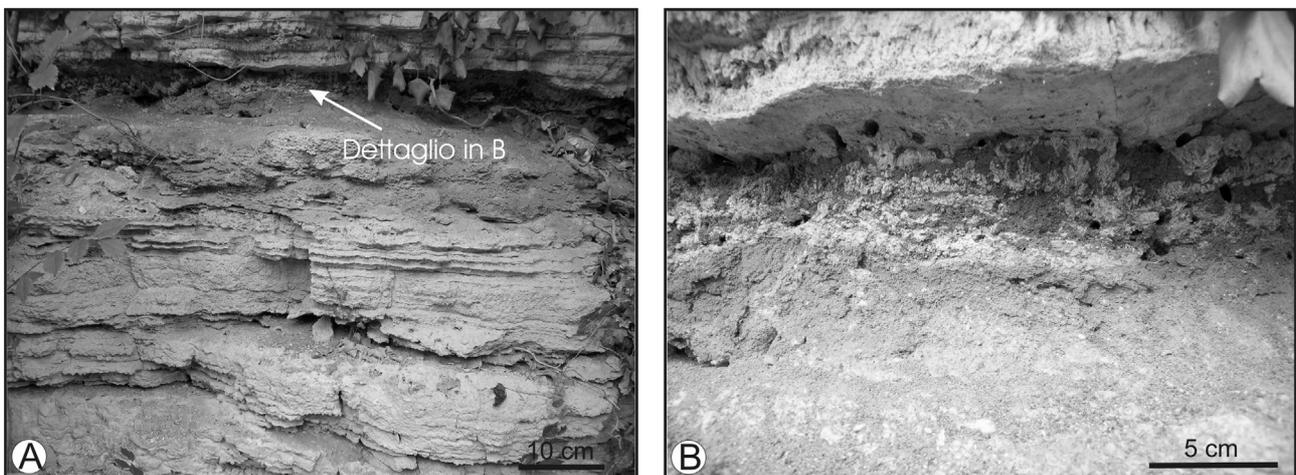


Fig. 7 - I depositi alluvionali riconoscibili nella scarpata del terrazzo fluviale sul quale è collocato lo stabilimento termale di S. Giovanni sono caratterizzati da alternanze di livelli sabbiosi con ghiaie e strati di calcari incrostanti. A) Alternanza di calcari incrostanti e livelli sabbiosi; la freccia indica l'area da cui proviene il dettaglio mostrato in B. B) dettaglio di A.

The alluvial deposits exposed in the scarp of the fluvial terrace on which the S. Giovanni thermal resorts are located, are characterised by sands and gravels with interbedded encrusting carbonates. A) Alternation of encrusting carbonates and sandy layers; the arrow indicates the enlarged area illustrated in detail in B. B) detail of A.

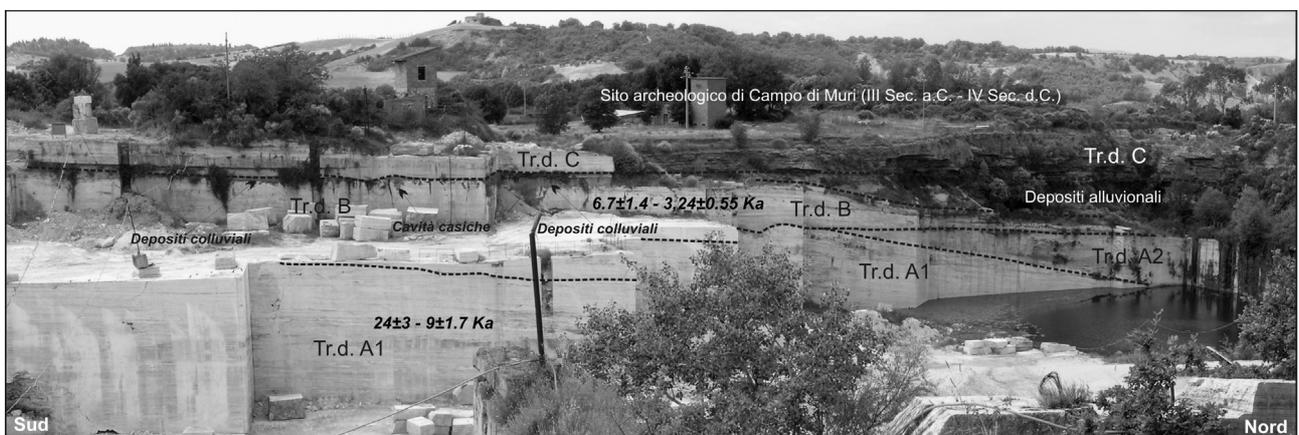


Fig. 8 - Fronte occidentale della Cava di travertino di Campo Muri con evidenziate le discordanze angolari e con le età di ciascun episodio deposizionale come ricavato dalle analisi radiometriche $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ realizzate da CARRARA *et al.* (1998).

*Western fresh-cut of the Campo Muri travertine quarry. The angular unconformities and the $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ radiometric ages of the depositional systems (from CARRARA *et al.*, 1998) are given.*

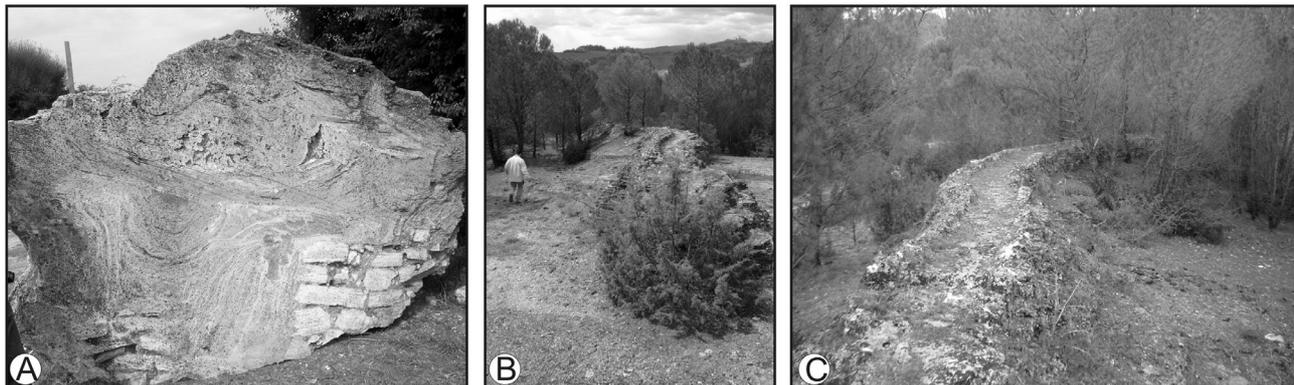


Fig. 9 - A) Canale di epoca etrusco-romana (III Sec. a.C. – IV Sec. d.C.) riempito da travertino a seguito dell'abbandono dello stabilimento termale e conseguente mancanza di regimazione del flusso delle acque delle sorgenti; B) e C) particolare di canali autocostruiti dovuti al deflusso delle acque emergenti dalla sorgente "Buca delle Fate" (a in Figura 6) che alimentava lo stabilimento termale di epoca etrusco-romana presso Campo Muri.

A) *Anthropic channel (III Sec. a.C. – IV Sec. d.C.) filled by travertine due to the abandon of the thermal resort; B) and C) self built channels developed from the thermal waters running toward the Ombrone river from the "Buca delle Fate" thermal spring (point a in Figure 6). This thermal spring fed the Campo Muri thermal resort during the Etruscan-Roman period.*

sono presenti gli attuali stabilimenti termali. Tuttavia il loro spessore risulterebbe molto ridotto sugli alti morfologici poiché più vicini all'area sorgiva. Lo spessore del travertino che ricopre il terrazzo fluviale, infatti, è stato ricostruito mediante una perforazione recentemente effettuata per la captazione di acque termali (Fig. 6), realizzata in prossimità della mofeta. Il sondaggio ha attraversato circa 24 metri di travertino chiaro, stratificato, sovrastante una alternanza di livelli travertinoso-sabbiosi di colore grigio e grigio scuro caratterizzati da una importante componente detritica costituita da granuli di quarzo e miche bianche. Tale successione è stata perforata fino a 37 metri; al di sotto di questa quota sono state incontrate le argille marine del Pliocene medio.

3.1 - La dorsale di travertino (*travertine fissure-ridge*)

Questo elemento morfo-strutturale (Fig. 10) si colloca circa 100 metri a sud dalla mofeta del Bossoleto (Fig. 6) e si estende per circa 250 metri in direzione ONO-ESE. La sua edificazione appare essenzialmente legata all'esistenza di sorgenti allineate, caratterizzate da attività intermittente che hanno dato luogo alla deposizione di travertino in una dorsale allungata (Fig. 10) che raggiunge localmente la larghezza di circa 40 metri ed un'altezza massima di 10 metri. La fuoriuscita delle acque termali dalla frattura sommitale e dai conetti associati, e lo scorrimento lungo i fianchi della dorsale, ne ha determinato la crescita e lo sviluppo (Fig. 11). Il suo profilo è asimmetrico: la parte meridionale è più alta, mentre quella settentrionale non supera i 5 metri. Essa, infatti, si è sviluppata in corrispondenza di un gradino morfologico che raccorda due superfici orizzontali il cui dislivello è di circa 8 metri (Fig. 10). Tale gradino morfologico è riconoscibile anche agli estremi della *fissure-ridge* ed è particolarmente evidente, nelle foto aeree, per circa 300 metri verso la sua prosecuzione orientale. Questo gradino morfologico è riferibile alla scarpata di una faglia che avrebbe dislocato il terrazzo fluviale di quota 280 metri e che, in corrispondenza della zona ribassata dalla faglia, raggiunge la quota media di 270 metri.

3.1.1 - *Facies deposizionali*

Lo studio delle facies deposizionali dei travertini delle Terme di S.Giovanni è stato condotto da diversi autori che hanno concentrato le loro attenzioni soprattutto sulla definizione litologica e geochemica delle facies in formazione e della distribuzione di quelle più antiche presenti nel complesso calcareo di origine termale (GUO & RIDING, 1992, 1994; FOLK *et al.*, 1985; FOUKE *et al.*, 2000).

Nell'insieme, la *fissure-ridge* è caratterizzata da tre principali morfologie deposizionali: liscia (Fig. 11f), microterrazzata (Fig. 11g) e macroterrazzata (Fig. 11h), corrispondenti a strutture deposizionali riconosciute da GUO & RIDING (1998).

I fianchi lisci sono formati dalla sovrapposizione di croste cristalline da bianche a grigie composte da larghi cristalli di calcite che crescono perpendicolari alla superficie deposizionale.

I fianchi microterrazzati si caratterizzano per la presenza di piccoli terrazzi disposti fittamente con un piccolo bordo liscio rialzato di alcuni millimetri e che creano micropiscine (*rimstone pool*, WARWICK, 1952) larghe alcuni centimetri quadrati.

Identica strutturazione è presente nei macroterrazzi; la differenza risiede nelle maggiori dimensioni.

Le porzioni della dorsale dove la deposizione è attiva o inattiva, possono essere riconosciute dalla colorazione dei travertini e dalla colonizzazione delle piante. Le aree con recentissima deposizione sono di colore chiaro, talvolta bianco, e caratterizzate dalla totale assenza di piante. Questo "deserto bianco" contrasta totalmente con le superfici attive, caratterizzate da colorazioni grigie scure e presenza talvolta massiccia di giunchi ed altre macrofite. La colorazione scura è data dalla presenza di colonie batteriche. Cespugli di macrofite, talora associate a muschi ed alghe, riescono ad insediarsi in questo ambiente ostile quando le condizioni chimico-fisiche iniziali (temperatura, gas disciolti, pH...) vengono mitigate dalla diluizione di acque "fredde" o di origine meteorica/fluviale.

L'assetto interno della *fissure-ridge* è osservabile in piccoli saggi di cava presenti nel profilo trasversale

(Fig. 11a). Esso risulta formato principalmente dalla sovrapposizione di croste cristalline (*Crystalline crust*) parallele alla superficie deposizionale, che formano set di lamine composte da cristalli di calcite disposti a ventagli (*Ray Crystals* in CHAFETZ & FOLK, 1984; FOLK *et al.*, 1985) o a piuma (*Feather Calcite Crystals* in GUO & RIDING, 1992).

Queste lamine si alternano con:

- livelli formati da strutture a "cespugli" (*shrub*) composti principalmente da calcite macrocristallina (*Needle Crystal Shrub*: GUO & RIDING 1994, 1998) talora associati a porzioni micritiche (*Micrite/Spar-Rhomb Shrub*; GUO & RIDING 1994, 1998). L'origine di questa struttura, tipica di ambienti con scarsa energia, viene interpretata sia come organica (CHAFETZ & FOLK 1984) sia

come inorganica (PENTECOST, 1990).

- livelli formati dalla sovrapposizione di lamine millimetriche cristalline (*paper-thin rafts*) che si depositano all'interfaccia acqua/aria di piccole pozze con scarsa energia. Quando l'energia è maggiore, le lamine si rompono depositandosi in accumuli sul fondo delle pozze.
- accumuli lenticolari di pisoidi (*Pisoids*) di differenti misure, densamente impacchettati ed intercalati a livelli micritici. GUO & RIDING (1998) ne riconoscono tre tipi basandosi sulle microstrutture: i) laminati concentricamente e di origine inorganica, anche se con parziali componenti organiche, formati in ambienti turbolenti di alta energia; ii) *Radial Shrub*, con delicata struttura dendritica ed associati batteri, cianobatteri e

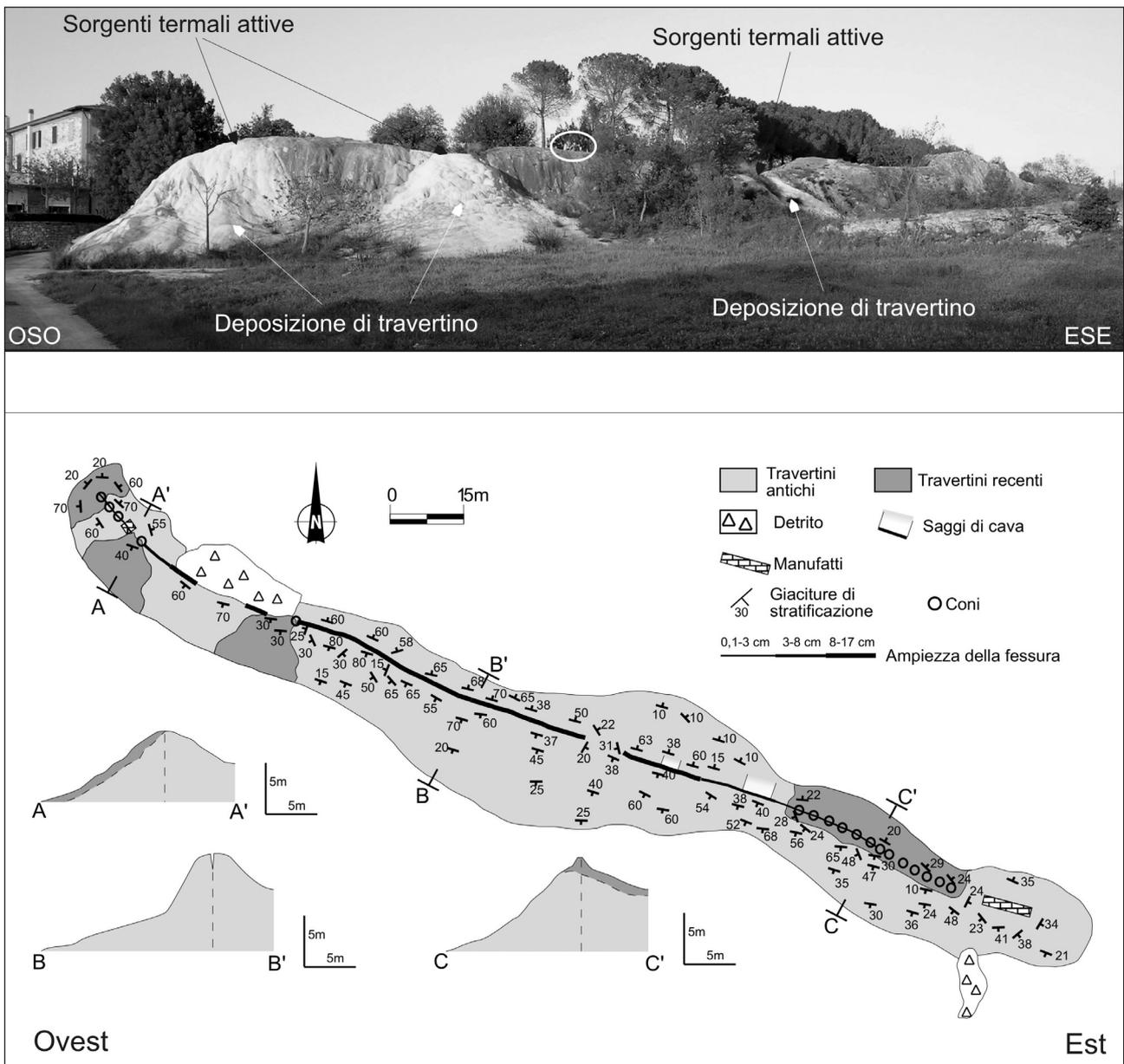


Fig. 10 - La fissure-ridge di travertino presente presso lo stabilimento termale di S.Giovanni. Tale struttura è orientata circa ONO-ESE e mostra un profilo asimmetrico. Lungo la sommità è presente una frattura la cui larghezza varia da 17cm a qualche millimetro.

The travertine fissure-ridge located close to the S.Giovanni thermal resort. This structure, ESE striking, shows an asymmetrical profile. On the top of the fissure-ridge, a fissure ranging from 0,1 to 17 cm, is located.



Fig. 11 - Particolari del travertino che costituisce la *fissure-ridge* delle Terme di S.Giovanni; a₁) lungo la sommità della dorsale sono presenti alcune cavette che mettono in evidenza la struttura interna della dorsale; a₂) particolare di a₁; b) la fessura che attraversa tutta la dorsale è massima in corrispondenza della sua zona mediana, dove raggiunge 17 cm; c) in corrispondenza degli estremi, invece, la fessura è larga al massimo qualche millimetro; d₁) agli estremi sono presenti coni dai quali fuoriesce acqua ad intervalli oppure dove gorgoglia anidride carbonica; d₂) alcune volte i coni sono fessurati e (d₃) la fessura li divide a metà per tutta la lunghezza della dorsale (d₄); e) in corrispondenza dell'estremità occidentale della dorsale la fessura che attraversa la sommità dell'intera struttura ha dislocato un manufatto collocato sulla dorsale a circa metà degli anni 50, testimoniando una recentissima fessurazione del travertino. f) in alcuni tratti il travertino che costituisce la dorsale è liscio (f), mentre altre volte è microterrizzato (g₁ e g₂) o macroterrizzato (h₁, h₂); i terrazzi di ordine maggiore possono raggiungere il metro di diametro e dar luogo a piccole vasche sospese, riempite d'acqua (h₃).

Travertine features of the S.Giovanni fissure-ridge: a₁) small quarries located along the fissure-ridge highlight the internal architecture of the ridge.; a₂) particular of a₁; b) the width of the fissure at the top of the ridge is maximum (17 cm) in the middle part of the fissure-ridge; c) the fissure located at the top of the fissure-ridge is about 1-2 mm wide at the extremities of the fissure-ridge; d₁) at the extremities of the fissure-ridge cones from which thermal water and carbon dioxide rise up, are located; d₂) cones can be fissured and (d₃) the fissure divides into two halves the cones along the fissure-ridge (d₄); e) in the western extremity of the fissure-ridge, a man-made feature located at the top of the ridge during 50s has been widely fissured; f) the travertine of the fissure-ridge can be smooth (f), microterraced (g₁ e g₂) o macroterraced (h₁, h₂); the macroterraces can reach one metre and can give rise to pools containing thermal water (h₃).

- diatomiti, formati in *pools* saltuariamente agitate; iii) mammellonati, stromatolitici con concrescimenti irregolari, spesso coperti da filamenti cianobatteriali di ambienti a bassa energia.
- livelli con cavità sferiche o circolari, di varia misura, aperte o chiuse corrispondenti a bolle di gas ricoperte da calcite (*coated bubble*) secondo un meccanismo illustrato da CHAFETZ *et al.*, 1991. Il gas probabilmente deriva principalmente da attività microbica dei sedimenti sottostanti (GUO & RIDING, 1998) o per locale turbolenza delle acque.
 - strutture isolate (*mounds*) costituite da rilievi formati dalla concentrazione di steli incrostati (manicotti calcarei cristallini di giunchi (*reed*) in posizione di vita. Si formano principalmente in ambienti palustri (pozze o laghetti distali) dove le acque termali raffreddate o diluite da altre acque di origine fluvio-meteorica permettono la colonizzazione delle piante superiori. L'elevata presenza di queste piante costituisce una barriera al fluire dell'acqua e determina variazioni morfologiche del sistema.
 - accumuli lenticolari di granuli carbonati (*lithoclast travertine*) derivanti dalla rielaborazione penecontemporanea delle altre macrofacies calcaree. Possono contenere anche frammenti di vegetali incrostati e localmente gasteropodi, ostracodi (*skeletal grains*), ossa di vertebrati e materiale extrabacinale apportato dal vento, da corsi d'acqua ecc.
 - livelli continui, talvolta ben sviluppati, di silt argillosi ocra scuri o rossi (*Paleosols*). Questi si formano in corrispondenza di superfici in erosione durante periodi di prolungata inattività del sistema deposizionale/sorgivo.

4. IL CONTROLLO STRUTTURALE DELLA CIRCOLAZIONE IDROTERMALE

I depositi di travertino e le sorgenti termali di S. Giovanni Terme mostrano alcune caratteristiche peculiari che li differenziano dagli altri depositi di travertino e dalle sorgenti presenti nell'area di Rapolano Terme. Infatti, mentre la circolazione idrotermale che caratterizza l'area di Rapolano è più o meno concentrata lungo la Faglia di Rapolano, dove quest'ultima è stata dislocata dalle faglie più recenti, le emergenze termali di S. Giovanni si collocano a circa 2 km dalla suddetta struttura. Inoltre, le caratteristiche chimiche delle acque che oggi fuoriescono nell'area di S. Giovanni suggeriscono un loro percorso di circolazione e risalita diverso da quello delle acque che emergono in corrispondenza delle altre sorgenti termali (MINISSALE *et al.*, 2002b). In particolare, i rapporti isotopici dell'elio ($^3\text{He}/^4\text{He}$), così come quelli del carbonio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) indicano a S. Giovanni la presenza di gas provenienti da zone profonde della crosta, probabilmente originati da processi metamorfici e/o magmatici, che si sono mescolati con fluidi e gas provenienti da livelli strutturali più superficiali (MINISSALE *et al.* 2002b *cum bibl.*).

Lo studio geologico condotto nell'area ha permesso di individuare l'esistenza di alcune faglie dirette che hanno giocato un ruolo fondamentale per la circolazione idrotermale negli ultimi 25 ka e per la loro risalita verso la superficie. Per quanto l'attività di queste faglie sia molto recente, esse sono di difficile individuazione

a causa di due principali fattori: a) le loro tracce in superficie sono state largamente ricoperte dal travertino che si è depositato dalle sorgenti; b) l'attività antropica ha modellato il paesaggio soprattutto a causa delle intense coltivazioni. Tuttavia la loro presenza è convalidata da alcuni indizi, quali l'allineamento di sorgenti attive e non, la dislocazione di corpi geologici più antichi dei travertini ed infine l'esposizione di alcune strutture minori (faglie e fratture) associate alla faglia principale. L'analisi integrata di tali elementi ha permesso di ricostruire la geometria e la cinematica delle faglie che costituiscono il sistema principale delle strutture responsabili del termalismo e della deposizione del travertino nell'area di S. Giovanni Terme.

Poche centinaia di metri a nord-ovest dell'area di Campo Muri è presente un deposito di travertino che costituisce un elemento morfologico positivo a sezione circolare, di circa 150 metri di diametro, che si eleva circa 25 metri rispetto alle aree circostanti (punto *b* in Figura 6). Il travertino che costituisce tale rilievo è ben stratificato ed è disposto con simmetria centrifuga rispetto alla parte sommitale, suggerendo che esso è stato depositato da acque che defluivano da una sorgente posta nella zona apicale del rilievo verso le aree morfologicamente più depresse. Questa sorgente e quella della Buca delle Fate (punto *a* in Figura 6) sono allineate parallelamente alla *fissure-ridge* di travertino presente presso lo stabilimento termale di S. Giovanni. Verso est, i punti (*a*) e (*b*) si allineano con un'altra sorgente, anch'essa non più attiva, che è stata responsabile dello sviluppo di un deposito di travertino poco esteso arealmente, spesso fino a 10 metri (punto *c* in Figura 6). Tale deposito di travertino è adiacente alla traccia della faglia di Rapolano che in questo tratto è sepolta da una spessa coltre di detrito. Queste evidenze indicano, con buona probabilità, l'esistenza di una faglia di età pleistocenica, orientata in direzione ONO-ESE, la cui attività ha permesso una importante circolazione idrotermale lungo alcuni suoi tratti e all'intersezione con la faglia di Rapolano, come documentato anche per altre faglie collocate più a sud presso Serre di Rapolano (BROGI, 2004). L'esistenza di questa faglia è inoltre dimostrata dalla evidente dislocazione della superficie di contatto tra i depositi limoso-argillosi di ambiente pelagico e le sovrastanti sabbie costiere del Pliocene Medio. Tale contatto, infatti, la cui giacitura è pressoché sempre orizzontale, affiora alla quota di 275 metri s.l.m. nel blocco ribassato dalla faglia (punto 1 in Figura 12), mentre nell'altro blocco affiora alla quota di 325 metri s.l.m (punto 2 in Figura 12). Questo permette di ipotizzare che il blocco ribassato coincida con la parte settentrionale dell'area di Campo Muri. Allo stesso modo è possibile stimare il rigetto verticale minimo di tale struttura che, sulla base delle differenze di quota del contatto tra argille e sabbie plioceniche, risulta essere di circa 50 metri. Informazioni più precise sulla cinematica di questa faglia sono state ricavate laddove questa struttura interseca la Faglia di Rapolano ed interessa la successione giurassica della Falda Toscana (punto A in Figura 12). Qui essa è costituita da una zona di deformazione piuttosto ampia, definita da numerose faglie dirette a rigetto metrico alle quali sono collegate numerose fratture ed evidenti fenomeni di idrotermalizzazione. In Figura 13 sono riportati alcuni particolari delle faglie minori studiate e la loro analisi cinematica:

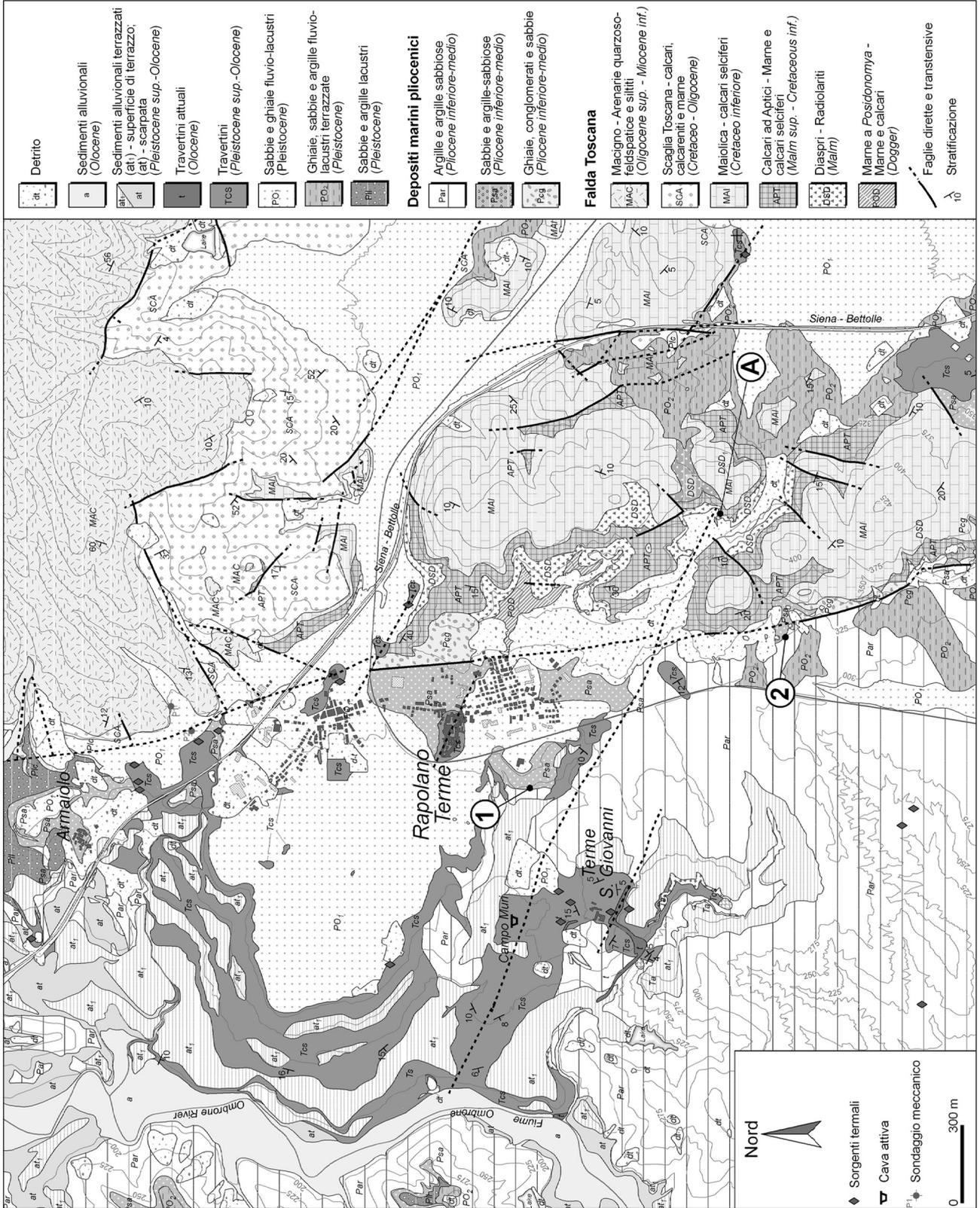


Fig. 12 - Carta geologica dell'area delle Terme di S. Giovanni. Il punto A indica l'area ove è stata realizzata l'analisi cinematica nelle faglie minori associate al sistema di faglie dirette che attraversano l'area di studio. I punti 1 e 2 sono discussi nel testo.

Geological map of the Terme S. Giovanni area. The point A indicates the area where the kinematics analysis of the minor faults and fractures related to the S. Giovanni fault systems has been performed. Points 1 and 2 are discussed in the text.

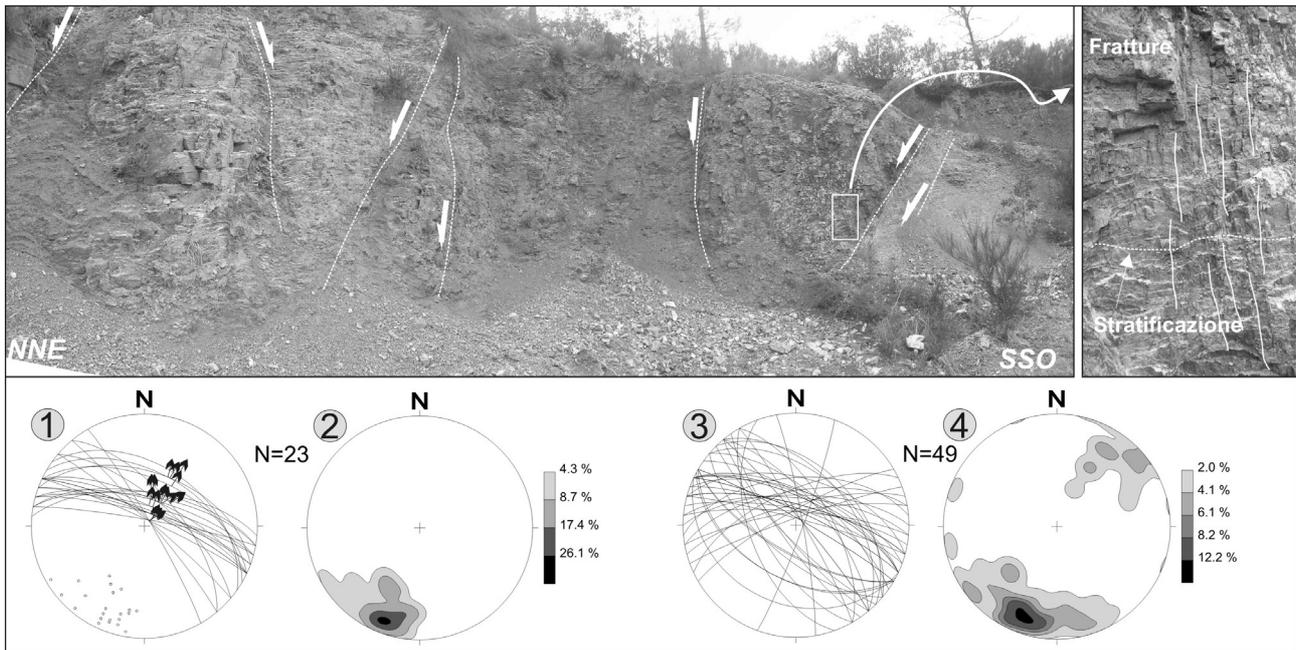


Fig. 13 - Analisi strutturale del sistema di faglie dirette minori associate alla faglia lungo la quale si collocano tre sorgenti termali non più attive, tra cui quella della Buca delle Fate che alimentava lo stabilimento termale di epoca etrusco-romana presso Campo Muri. Le rocce dislocate sono le radiolariti giurassiche della Formazione dei Diaspri. Lungo le zone di faglia sono presenti numerosissime fratture sub-verticali o molto inclinate che hanno costituito i condotti di risalita dei fluidi idrotermali, come testimoniato dalla mineralizzazione presente lungo le zone fratturate. I diagrammi stereografici (Diagramma di Schmidt, emisfero inferiore) indicano: 1) ciclografiche, poli e *pitch* delle strie riconosciute lungo i piani di faglia; 2) *contouring* dei dati riportati in 1; 3) fratture presenti nel tetto delle faglie con traccia di mineralizzazione; 4) *contouring* di 3.

Structural analysis of the minor normal faults related to the main fault along which the three inactive thermal springs are aligned. The dissected rocks consist of the Jurassic radiolarites belonging to the Diaspri Fm. The fault zone is characterised by numerous sub-vertical fractures along which hydrothermal fluids circulated, as attested by the mineralization occurring along some fractures. The stereographic diagrams (Schmidt diagram, lower hemisphere) indicate: 1) cyclographic traces, poles and pitch of the mechanical striae along the fault planes; 2) contouring of data given in 1; 3) cyclographic traces of the mineralised fractures occurring in the hangingwall of the normal faults; 4) contouring of the data given in 3.

sono riportati i diagrammi stereografici delle faglie e delle fratture e sono messi in evidenza quelle fratture lungo le quali vi è stata circolazione dei fluidi idrotermali collegati con la deposizione del travertino. Tali fratture, infatti, sono caratterizzate da vistosi fenomeni di ossido-riduzione del ferro. I processi chimico-fisici che favoriscono questo processo sono legati alla circolazione di fluidi contenenti composti chimici extra-formazionali quali, per esempio, idrocarburi, acidi organici, metano ed idrogeno solforato. Di questi, l'ultimo è quello che caratterizza tutte le acque termali dell'area di Rapolano (MINISSALE *et al.*, 2002b).

Il diverso chimismo delle acque termali di S.Giovanni Terme ed il conseguente percorso di circolazione e risalita, può trovare una spiegazione nell'assetto tettonico dell'area, come già descritto da COSTANTINI *et al.* (1982) e da BROGI *et al.* (2002). E' noto infatti che l'importante piega rovesciata che ha deformato la Falda Toscana e che affiora lungo la dorsale Monti del Chianti-Monte Cetona dalla zona di Montalceto (a sud di Serre di Rapolano) fino al Monte Cetona (PASSERINI, 1964; LAZZAROTTO, 1973) risulta dislocata dalla Faglia di Rapolano immediatamente a sud di Serre di Rapolano (BROGI *et al.*, 2002). Nell'area di S.Giovanni, quindi, tale struttura rimane sepolta al di sotto dei depositi neogene-quadernari del Bacino di Siena. Tale piega risulta sradicata al livello della successione evaporitica del Trias (Formazione anidritica di Burano) ed è sovrascor-

sa sui termini più recenti (Macigno) della Falda Toscana, costituente il blocco di muro. Questo assetto strutturale, già ipotizzato da COSTANTINI *et al.* (1982), ha trovato conferma negli studi di BROGI *et al.* (2002) e negli ultimi rilevamenti geologici realizzati a sud di Serre di Rapolano nell'ambito della nuova cartografia geologica della Regione Toscana alla scala 1:10000 (F. 309010). Tale assetto risulta di estrema importanza alla luce del fatto che l'anticlinale in parola potrebbe trovarsi proprio sepolta sotto l'area di S.Giovanni, come illustrato nella Figura 14. Tale elemento costituirebbe una struttura positiva caratterizzata da carbonati fratturati ed evaporiti che vanno a costituire un serbatoio alimentato, almeno in parte, da fluidi di origine profonda. La loro circolazione risente fortemente del controllo strutturale conseguente alla presenza di un livello cataclastico che coincide con la zona di *detachment* della piega. Tali fluidi, quindi, avrebbero una provenienza diversa rispetto a quelli che risalgono lungo la faglia di Rapolano e che, al contrario, circolano in livelli strutturali più superficiali. Naturalmente per le acque che risalgono nell'area di S.Giovanni non possono essere esclusi fenomeni di *mixing* con le acque meteoriche e con quelle che circolano al contatto con la copertura impermeabile rappresentata dalla argille del Pliocene (Fig. 14), come confermato dai dati geochemici di MINISSALE *et al.* (2002a).

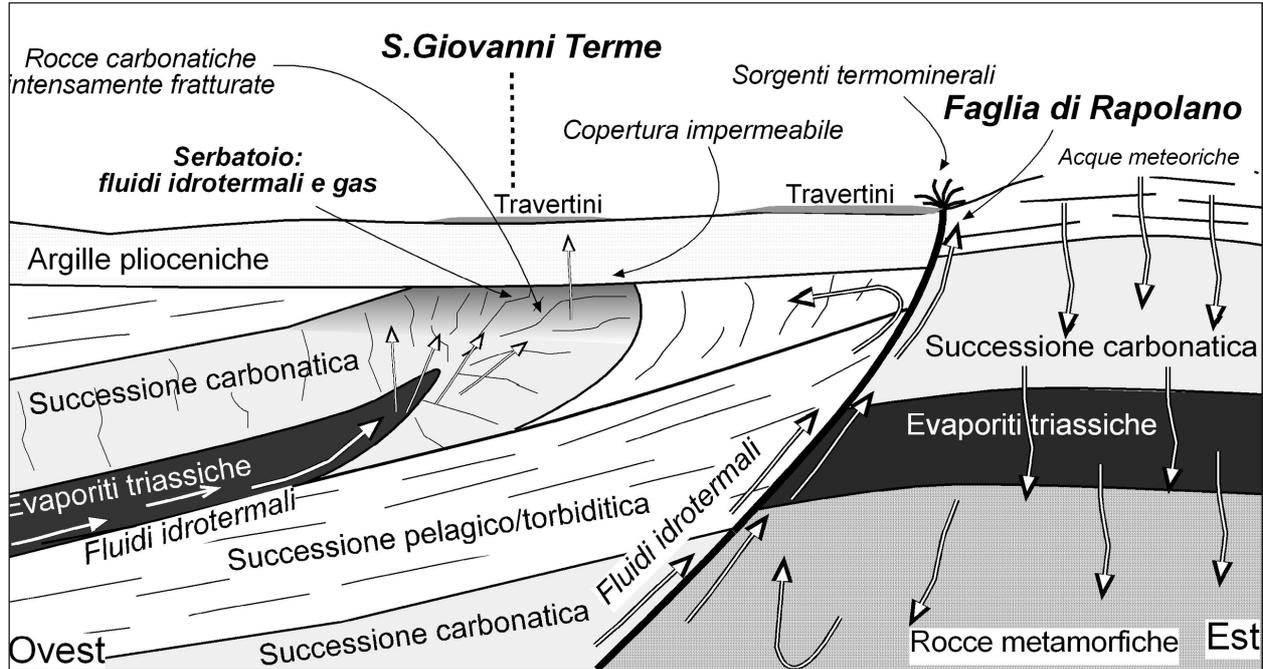


Fig. 14 - Sezione geologica schematica, non in scala, orientata circa ovest-est che mostra la relazione tra l'assetto tettonico dell'area delle Terme di S. Giovanni e la circolazione dei fluidi idrotermali. Mentre i fluidi che risalgono lungo la zona di danneggiamento della faglia di Rapolano hanno un percorso di circolazione piuttosto superficiale, quelli che risalgono alle Terme di S. Giovanni sono guidati da elementi strutturali diversi. Dal serbatoio costituito essenzialmente dal nucleo dell'anticlinale rovesciata del Monte Cetona (dislocata dalla Faglia di Rapolano in questo settore) i fluidi raggiungono la superficie attraverso le fratture collegate con la zona di danneggiamento del sistema di faglie a cui appartiene quella lungo la quale si è sviluppata la *fissure-ridge*. Tali faglie sono circa parallele alla sezione geologica e quindi non riportate nello schema. Si veda il testo per la discussione.

Schematic, not to scale, geological cross-section, W-E oriented, showing the relationships between the tectonic setting of the Terme S. Giovanni area and the hydrothermal fluid circulation. The fluids arising along the damaged zone of the Rapolano Fault follow a shallow pathway; in contrast, the hydrothermal fluids flowing from the Terme S. Giovanni thermal springs circulate at deepest levels. They are stocked within the nucleus of the Mt. Cetona anticline (dissected by the Rapolano Fault in this zone) which give rise to a reservoir due to the highly fractured carbonate rocks. The fluids can escape toward the surface through vertical fractures related to the damaged zone of a fault system to which the normal fault giving rise to the travertine fissure-ridge belongs. All these faults are about parallel to the geological section and thus they cannot be reported. See the text for discussion.

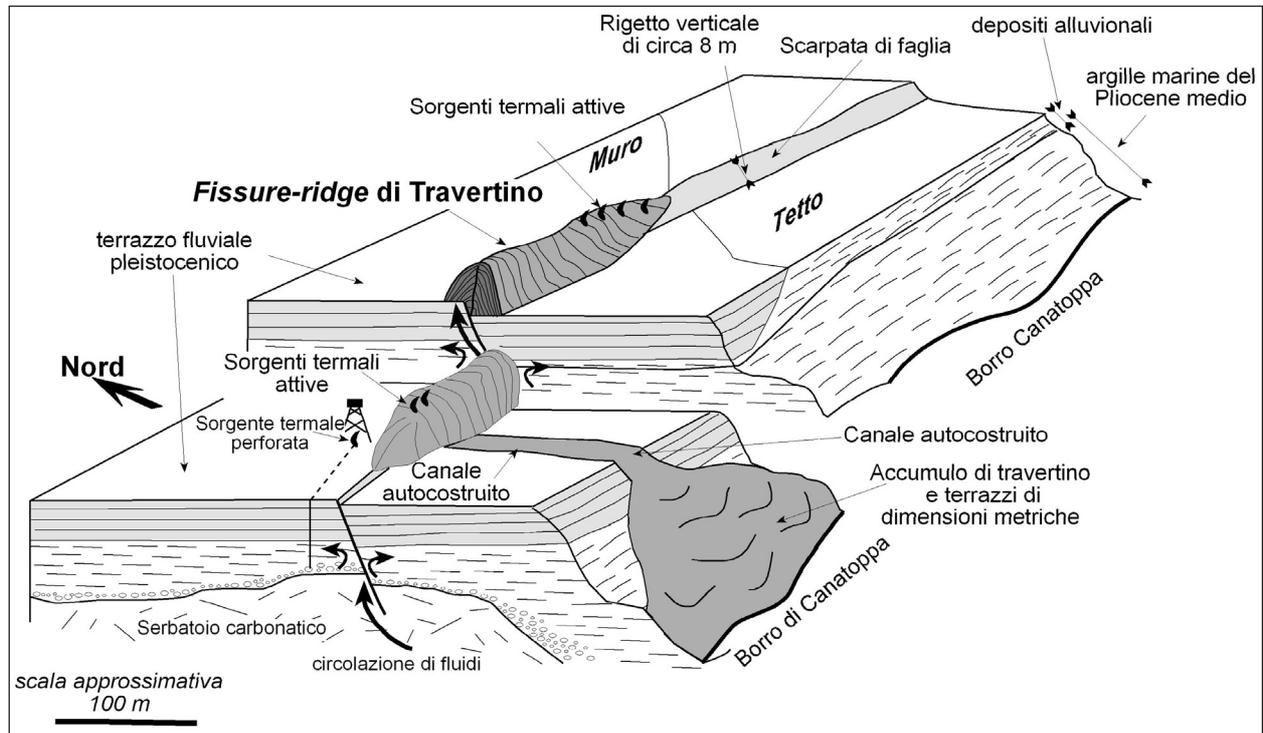


Fig. 15 - Schema che mostra come la *fissure-ridge* delle Terme di S. Giovanni si sia sviluppata lungo la traccia di una faglia di età molto recente, probabilmente ancora attiva, che ha dislocato i depositi di un terrazzo fluviale collegato con l'evoluzione idrografica del Fiume Ombrone.

Cartoon showing the relationships between the travertine fissure-ridge and the normal fault, probably active, dissecting the alluvial deposits of a fluvial terrace developed together with the hydrographic evolution of the Ombrone River.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'evoluzione deposizionale del travertino nell'area delle Terme di S. Giovanni testimonia un'attività idrotermale prolungata nel tempo, iniziata circa 24 ± 3 ka e caratterizzata da periodi di attività alternati a momenti di stasi. Per il significato tettonico che le manifestazioni idrotermali rivestono, è quindi possibile ritenere che l'area in studio sia stata caratterizzata da una attività tettonica intermittente dal Pleistocene superiore all'Olocene. In particolare, sulla base delle caratteristiche morfo-strutturali e dell'attività idrotermale collegata alla *travertine fissure-ridge* è possibile ipotizzare l'esistenza di attività tettonica probabilmente tuttora in atto. La *fissure-ridge*, infatti, si è sviluppata lungo la traccia di una faglia presumibilmente con cinematica normale che ha dislocato un terrazzo fluviale di età pleistocenica, nonché i depositi di travertino collegati con l'attività della sorgente del Bossoleto, la cui età più antica è riferibile con buona probabilità a 24 ± 3 ka (Fig. 15). La faglia lungo la quale si è sviluppata la *fissure-ridge* ha una età necessariamente più recente di 24 ± 3 ka, poiché disloca i travertini collegati con l'attività della sorgente del Bossoleto. La circolazione di fluidi, ancora attiva in corrispondenza di tale struttura, conferma che la zona di fratturazione collegata al movimento della faglia è ancora permeabile, implicando l'esistenza di fratture beanti a sostegno dell'attività molto recente della struttura considerando anche l'elevato potere incrostante di queste acque molto saline (MINISSALE *et al.*, 2002b). L'attività molto recente della faglia troverebbe inoltre conferma nella dislocazione dei travertini che si sono depositati nel Marzo 2003 in corrispondenza del margine orientale della *fissure-ridge* ed interessati da una fessurazione che fino a Novembre 2005 ha raggiunto localmente i 2 mm (Fig. 16). Sulla base di questi dati è possibile determinare il tasso di dilatazione degli ultimi 2,5 anni che risulta pari a circa 0,16 mm/anno. Tuttavia analoghe valutazioni possono essere fatte prendendo in considerazione un manufatto che è stato collocato circa nella metà del secolo scorso sulla sommità della *fissure-ridge*. Tale manufatto coincide con il bocca-pozzo di un sondaggio poco profondo dal quale veniva captata acqua termale, che oggi risulta vistosamente

dislocato (Fig. 11e). La dilatazione massima è di 1,1 cm implicando un tasso medio di dislocazione orizzontale pari a circa 0,02 mm/anno, considerando un movimento costante nel tempo. La dislocazione orizzontale della fessura che attraversa interamente la sommità della *fissure-ridge*, è apparentemente in contraddizione con la natura di faglia diretta della struttura dalla quale la *fissure-ridge* ha avuto origine. Essa, infatti, sulla base della differente quota del terrazzo dislocato, ha prodotto un rigetto verticale di circa 8 metri in almeno 24 ka, considerando l'età più antica dei travertini dislocati dalla faglia. Sulla base di questa considerazione è possibile ricavare il tasso, sia pure indicativo, di rigetto verticale della faglia, che risulterebbe pari a 0,33 mm/anno. Questo dato, tuttavia, è da considerarsi il valore minimo della faglia, per il fatto che per il calcolo è stata utilizzata l'età più antica dei travertini dislocati

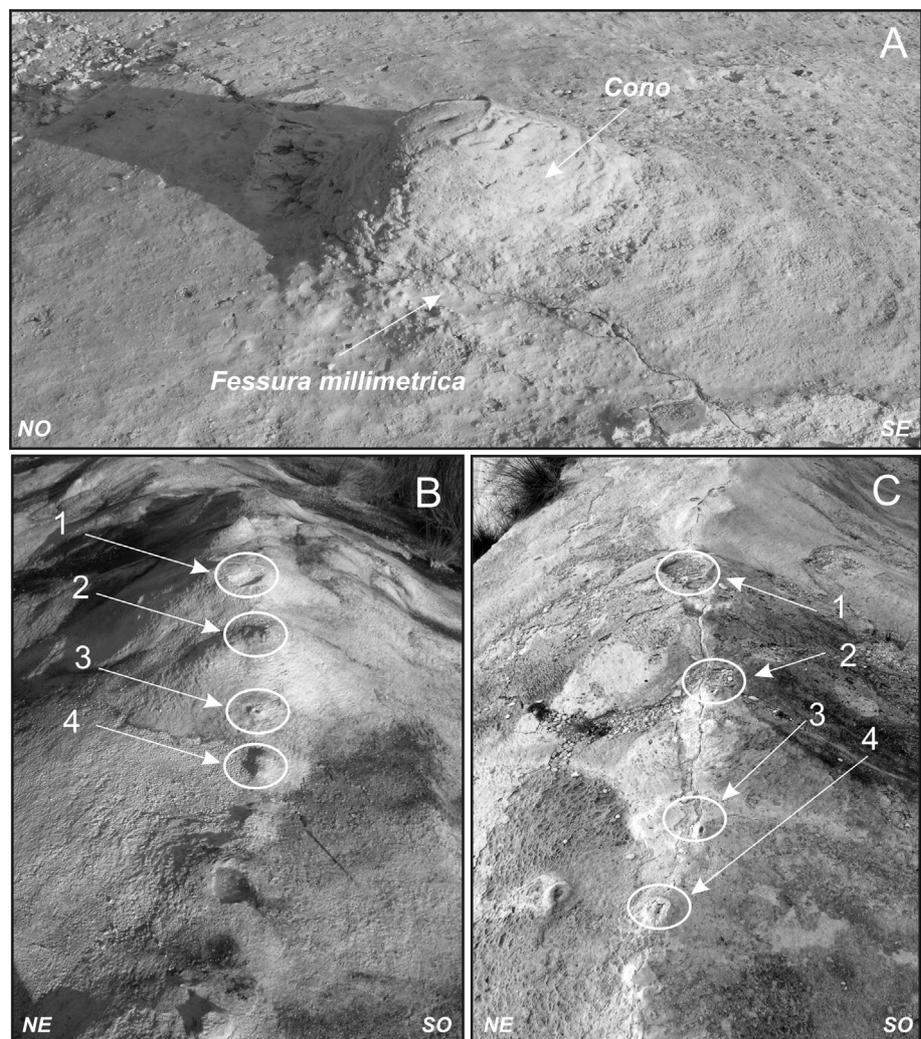


Fig. 16 - Il travertino che si è depositato nel Marzo del 2003 in corrispondenza delle due estremità della dorsale è stato interessato da fratturazione lungo la direzione della fessura principale che attraversa per intero tutta la struttura. I numeri 1, 2, 3 e 4 indicano gli stessi coni fotografati nel Marzo 2003 (a sinistra) e nel Novembre del 2005 (a destra) mostrando come il travertino depositato nel 2003 sia già stato attraversato da una fessura larga qualche millimetro.

The travertine deposited in March 2003 at the extremities of the travertine fissure-ridge has been broadly fissured. The numbers 1, 2, 3 and 4 indicate the same cones photographed at different times (March 2003, to the left and November 2005, to the right), highlighting how the new travertine has been fissured for some millimetres in 2.5 years.

dalla faglia. D'altra parte il movimento dilatante lungo la traccia della faglia, testimoniato con certezza almeno per gli ultimi 50 anni, inducono ad ipotizzare che nell'ultimo periodo la faglia potrebbe essere stata sottoposta ad un accumulo di tensioni che hanno prodotto soltanto una dilatazione orizzontale, ma che potrebbero preannunciare l'imminente riattivazione della faglia. Naturalmente la faglia potrebbe essere caratterizzata da un comportamento asismico che tuttavia, ad oggi, non siamo in grado di dimostrare.

Nell'insieme, comunque, le relazioni esistenti tra l'attività idrotermale e la deposizione di travertino costituiscono un buon esempio di correlazione tra travertini ed elementi strutturali che rappresentano l'espressione superficiale di tensioni accumulatisi nella crosta superiore a seguito di sollecitazioni tettoniche. Ne deriva un quadro geologico piuttosto chiaro con importanti implicazioni di carattere neotettonico, che mette in evidenza strutture attive e potenzialmente sismogenetiche. Per questo motivo, è nostro parere la necessità di un monitoraggio finalizzato al controllo dei movimenti lungo la faglia delle Terme di S. Giovanni mediante l'applicazione di sensori che possano analizzare il progressivo movimento nel tempo attraverso la *fissure-ridge*, ottimo indicatore tettonico.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano A. Costantini e A. Lazzarotto per gli innumerevoli scambi di opinione in merito allo sviluppo della *fissure-ridge* ed alla deposizione dei travertini nell'area di S. Giovanni; gli autori ringraziano, inoltre, C. Carrara per la discussione scientifica sui travertini di Campo Muri.

Si ringraziano inoltre due revisori anonimi per i consigli ed i suggerimenti utili a migliorare la versione originale del manoscritto.

Questo lavoro è stato eseguito con i finanziamenti dell'Università di Siena (PAR 2005, coordinatore scientifico A. Lazzarotto) e della Regione Toscana – Servizio Geologico Regionale (Progetto Cartografia Geologica della Regione Toscana, scala 1:10.000).

LAVORI CITATI

- ACOCCELLA V., PASCUCCI V. & DOMINICI G. (2002) - *Basin deformation due to laccolith emplacement at Radicofani (Southern Tuscany, Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., Volume speciale, **1**, pp. 749-756.
- ALTUNEL E. (2005) - *Travertines: neotectonic indicators*. In: Ozkul, M., Yagiz, S. and Jones, B. (eds.): Proceedings of 1st International Symposium on Travertine, September 21-25, 2005, Denizli-Turkey, pp. 105-106, Kozan Offset, Ankara.
- ALTUNEL E. & HANCOCK P.L. (1993a) - *Morphology and structural setting of Quaternary travertines at Pamukkale, Turkey*. Geological Journal, **28**, pp. 335-346.
- ALTUNEL E. & HANCOCK P.L. (1993b) - *Active fissuring and faulting in Quaternary travertines at Pamukkale, western Turkey*. Z.Geomorph.N.F., **94**, pp. 285-302.
- ANDREWS J. & RIDING R. (2001) - *Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot spring (Angel terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National park, U.S.A.): Discussion*. Journal of Sedimentary Research, **71**, 496-497.
- ATABEY E. (2002) - *The formation of fissure ridge type laminated travertine-tufa deposits microscopical characteristics and diagenesis, Kirsehir, central Anatolia*. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, **123-124**, pp. 59-65.
- BALDI P., BERTINI G., CAMELI G.M., DECANDIA F.A., DINI I., LAZZAROTTO A. & LIOTTA D. (1994) - *Tettonica distensiva post-collisionale nell'area geotermica di Larderello (Toscana meridionale)*. Studi Geologici Camerti. Vol. Spec. **1**, pp. 183-193.
- BARAZZUOLI P., IZZO S., MENICORI P., MICHELUCCHINI M. & SALLEOLINI M. (1991) - *Un esempio di acquifero superficiale alimentato da acqua termale (Rapolano Terme, Siena)*. Boll. Soc. Geol. It., **110**, pp. 3-14.
- 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*. Studi Geologici Camerti, Vol. Spec.1 (1991), pp. 155-178.
- BONINI M. & SANI F. (2002) - *Extension and compression in the Northern Apennines (Italy) hinterland: evidence from the Late Miocene-Pliocene Siena-Radicofani Basin and relations with basement structures*. Tectonics, **21**(3), pp. 1-35.
- BROGI A. (2002) - *Relazione tra strutture distensive neogenico-quadernarie ed i depositi di travertino nell'area di Rapolano Terme (Appennino Settentrionale)*. Atti Tic. Sc. Terra, **43**, pp. 41-54.
- BROGI A. (2004) - *Faults linkage, damage rocks and hydrothermal fluid circulation: tectonic interpretation of the Rapolano Terme travertines (southern Tuscany, Italy) in the context of Northern Apennines Neogene-Quaternary extension*. Eclogae Geologicae Helvetiae, **97**, pp. 307-320.
- BROGI A. (2006) - *Neogene extension in the Northern Apennines (Italy): insights from the southern part of the Mt. Amiata geothermal area*. Geodinamica Acta, **19**, pp. 33-50.
- BROGI A., CAPEZZUOLI E., COSTANTINI A., GANDIN A. & LAZZAROTTO A. (2005a) - *Tectonics and travertine relationships in the Rapolano Terme area (Northern Apennines, Italy)*. Proceedings of 1st International Symposium on Travertine. September 21-25, 2005, Denizli Turkey, pp. 142-148, Kozan Offset, Ankara.
- BROGI A., COSTANTINI A. & LAZZAROTTO A. (1999) - *Carta geologica dell'area di Rapolano Terme*. S.El.Ca Firenze.
- BROGI A., COSTANTINI A. & LAZZAROTTO A. (2002) - *Structural setting of the Rapolano-Trequanda Ridge (southern Tuscany, Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. Spec. **1**, pp. 757-767.
- BROGI A., GHINASSI M., ALDINUCCI M., BAMBINI A.M., FORESI L.M. (2005c) - *New constraints for age determination of the Pliocene normal faults affecting the Rapolano-Trequanda ridge (southern Tuscany)*.

- Rend. Soc. Geol. It., **1**, 34-36.
- BROGI A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. & CROP-18 WORKING GROUP (2005b) - *Structural features of southern Tuscany and geological interpretation of the CROP 18 Seismic Reflection Survey (Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., **3**, pp. 213-236.
- BROGI A. & LIOTTA D. (2006) - *Understanding the crustal structures of southern Tuscany: the contribution of the CROP18 Project*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, **47**, pp. 401-424.
- BRUHN R.L., YONKEE W.A. & PARRY W.T. (1990) - *Structural and fluid-chemical properties of seismogenic normal faults: Tectonophysics*, **175**, pp. 139-157.
- ÇAKIR Z. (1999) - *Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition: examples from Western Turkey*. Turkish Journal of Earth Sciences, **8**, pp. 67-80.
- CARRARA C., CIUFFARELLA L. & PAGANIN G. (1998) - *Inquadramento geomorfologico e climatico-ambientale dei travertini di Rapolano Terme (SI)*. Il Quaternario, **11**, pp. 319-329.
- CHAFETZ H.S. & FOLK R.L. (1984) - *Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents*. J. Sedim. Petrol., **54**, pp. 289-316.
- CHAFETZ, H.S., RUSH, P.F. & UTECH, N.M. (1991) - *Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates: An example from an active travertine system*: Sedimentology, **38**, pp. 107-126.
- CIPRIANI N., ERCOLI A., MALESANI P. & VANNUCCI S. (1972) - *I travertini di Rapolano Terme (Siena)*. Mem. Soc. Geol. It., **11**, pp. 31-46.
- COLLETTINI C., DE PAOLA N., HOLDSWORTH R.E. & BARCHI M. (2006) - *The development and behaviour of low-angle normal faults during Cenozoic asymmetric extension in the Northern Apennines, Italy*. Journal of Structural Geology, **28**, pp. 333-352.
- COSTANTINI A., LAZZAROTTO A. & SANDRELLI F. (1982) - *Conoscenze geologico strutturali*. In: *Il Graben di Siena*. CNR-PFE-RF 9, pp. 11-32.
- CUREWITZ D. & KARSON J.A. (1997) - *Structural settings of hydrothermal outflow: fracture permeability maintained by fault propagation and interaction*. Journ. Volcan. and Geother. Res., **79**, pp. 149-168.
- DALLMEYER R.D. & LIOTTA D. (1998) - *Extension, uplift of rocks and cooling ages in thinned crustal provinces: the Larderello geothermal area (inner Northern Apennines, Italy)*. Geol. Mag., **135**, pp. 193-202.
- DU J., LIU C., FU B., NINOMIYA Y., ZHANG Y., WANG C., WANG H. & SUN Z. (2005) - *Variations of geothermometry and chemical-isotopic compositions of hot spring fluids in the Rehai geothermal field, southwestern China*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **142**, pp.243- 261.
- FINETTI I.R., BOCCALETTI M., BONINI M., DEL BEN A., GELETTI R., PIPAN M. & SANI F. (2001) - *Crustal section based on CROP seismic data across the North Tyrrhenian-Northern Apennines-Adriatic Sea*. Tectonophysics, **343**, pp. 135-163.
- FOLK R., CHAFETZ H.S. & TIEZZI P.A. (1985) - *Bizarre forms of depositional and diagenetic calcite in hot-spring travertines, Central Italy*. In SCHNEIDER-MANN N. & HARRIS P. (Eds): *The Biology of Blue-Green Algae*. Oxford, Blackwell Scientific Publication, pp. 434-472.
- FOUKE B.W., FARMER J.D., DES MARAIS D.J., PRATT L., STURCHIO N.C., BURNS P.C. & DISCIPULO M.K. (2000) - *Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot spring (Angel Terrace, Mammoth Hot Spring, Yellowstone National Park, U.S.A.)*. Journal of Sedimentary Research, **70**(3), pp. 565-585.
- FOUKE B.W. (2001) - *Reply - Depositional facies and Aqueous-Solid geochemistry of travertine-depositing hot spring (Angel terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National park, U.S.A.)*. Journal of Sedimentary Research, **71**, 496-497.
- GUO L. & RIDING R. (1992) - *Micritic aragonite laminae in hot water travertine crust, Rapolano Terme*. Sedimentology, **39**, pp. 1067-1079.
- GUO L. & RIDING R. (1994) - *Origin and diagenesis of Quaternary travertine shrub facies, Rapolano Terme, central Italy*. Sedimentology, **41**, pp. 499-520.
- GUO L. & RIDING R. (1998) - *Hot-spring travertine facies and sequences, late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy*. Sedimentology, **45**, pp. 163-180.
- GUO L. & RIDING R. (1999) - *Rapid facies change in Holocene fissure ridge hot spring travertines, Rapolano Terme, Italy*. Sedimentology, **46**, pp. 1145-1158.
- HANCOCK P.L., CHALMERS R.M.L., ALTUNEL E. & ÇAKIR Z. (1999) - *Travertines: using travertines in active fault studies*. Journ. Struct. Geol., **21**, pp. 903-916.
- JANSSEN A., SWENNEN R., PODOOR N. & KEPPENS E. (1999) - *Biological and diagenetic influence in Recent and fossil tufa deposits from Belgium*. Sedimentary Geology, **126**, pp. 75-95.
- KHARAKA Y.K., SOREY M.L. & THORSDEN J.J. (2000) - *Large-scale hydrothermal fluid discharges in the Norris-Mammoth corridor, Yellowstone National Park, USA*. Journal of Geochemical Exploration, **69-70**, pp. 201-205.
- LAZZAROTTO A. (1973) - *Caratteri strutturali dei nuclei mesozoici di Montalceto, Trequanda e Piazza di Siena (Prov. di Siena)*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Serie A, **79**, pp. 251-266.
- LECCHINI F. & MAZZINI D. (1986) - *Rapolano ed il suo territorio*, Vol. **2**, Al.sa.Ba. 1986, pp. 236.
- LIOTTA D. (1994) - *Structural features of the Radicofani basin along the Piancastagnaio (Mt. Amiata) - S.Casciano dei Bagni (Mt. Cetona) cross section* - Mem. Soc. Geol. It., **48**, pp. 401-408.
- LIOTTA D. (1996) - *Analisi del settore centro-meridionale del bacino pliocenico di Radicofani (Toscana meridionale)* - Boll. Soc. Geol. It., **115**, pp. 115-143.
- LIOTTA D. & SALVATORINI G. (1994) - *Evoluzione sedimentaria e tettonica della parte centro-meridionale del bacino pliocenico di Radicofani* - Studi Geologici Cemerti, Vol. Spec. 1994/1, pp. 65-77.
- LIVNAT A. & KRONFELD J. (1985) - *Paleoclimatic implications of U-series dates for lake sediments and travertines in the Arava Rift Valley, Israel* - Quaternary Research, **24**, pp. 164-172.

- LOSACCO U. (1952) - *La struttura del territorio di Rapolano e Lucignano (Siena e Arezzo)* - Boll. Soc. Geol. It., **70**(2), pp. 402-434.
- LOSACCO U. & DEL GIUDICE D. (1958) - *Stratigrafia e tettonica degli affioramenti mesozoici posti fra le colline di Rapolano ed il Monte Cetona (Siena)* - Boll. Soc. Geol. It., **77**, pp. 1-32.
- MANTOVANI E., ALBARELLO D., TAMBURELLI C. & BABBUCCI D. (1995) - *Evolution Of The Tyrrhenian Basin And Surrounding Regions As A Result Of The Africa-Eurasia Convergence* - Journal Geodinamics, **21**, pp. 35-72.
- MANTOVANI E., ALBARELLO D., TAMBURELLI C. & BABBUCCI D. (1997) - *Recent/Present tectonic processes in the Italian region and their relation with seismic and volcanic activity*. Ann. Tect., **XI**, 27-57.
- MARTÍN-ALGARRA A., MARTÍN-MARTÍNA M., ANDREOC B., JULIÀ R. & GONZÁLEZ-GÓMEZ C. (2003) - *Sedimentary patterns in perched spring travertines near Granada (Spain) as indicators of the paleohydrological and paleoclimatological evolution of a karst massif* - Sedimentary Geology, **161**, pp. 217-228.
- MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993) - *Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines* - Earth Sciences Reviews, **34**, pp. 197-233.
- MINISSALE A., KERRICK D.M., MAGRO G., MURRELL M.T., PALADINI M., RIHS S., STURCHIO N.C., TASSI F. & VASELLI O. (2002b) - *Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications* - Earth and Planetary Science Letters, **203**, pp. 709-728.
- MINISSALE A., MAGRO G., MARTINELLI G., VASELLI O. & TASSI G.F. (2000) - *Fluid geochemical transect in the Northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications* - Tectonophysics, **319**, pp. 199-222.
- MINISSALE A., VASELLI O., TASSI F., MAGRO G. & GRECHI G.P. (2002a) - *Fluid mixing in carbonate aquifers near Rapolano (central Italy): chemical and isotopic constraints* - Applied Geochemistry, **17**, pp. 1329-1342.
- PASCUCCI V., COSTANTINI A., MARTINI I.P. & DRINGOLI R. (2005) - *Tectono-sedimentary analysis of a complex, extensional, Neogene basin formed on thrust-faulted, Northern Apennines hinterland: Radicofani Basin, Italy*. Sed. Geol., **183**, 71-97.
- PASSERINI P. (1964) - *Il Monte Cetona (Provincia di Siena)* - Boll. Soc. Geol. It., **83**, pp. 219-238.
- PENTECOST A. (1990) - *The formation of travertine shrubs: Mammoth Hot Springs, Wyoming* - Geological Magazine, **127**(2), pp. 159-168.
- VAN GARDINGEN P.R., GRACE J., JEFFREE C.E., BYARI S.H., MIGLIETTA F., RASCHI A. & BETTARINI I. (1997) - *Long-term effects of enhanced CO₂ concentrations of leaf gas exchange: research opportunities using CO₂ springs* - In RASCHI A., MIGLIETTA F., TOGNETTI R., VAN GARDINGEN P.R. (eds), *Plant responses to elevated CO₂ evidence from natural springs*. Cambridge University Press. 272 pp.
- VIOLANTE C., FERRERI V., D'ARGENIO B. & GOLUBIC S. (1994) - *Quaternary travertines at Rocchetta a Volturno (Isernia, Central Italy). Facies analysis and sedimentary model of an organogenic carbonate system* - I.A.S. 15th Reg. Meet., April, 1994, Ischia, Guide book to the field trip, pp. 3-23.
- VITI M., MANTOVANI E., BABBUCCI D. & TAMBURELLI C. (2006) - *Quaternary geodynamics and deformation pattern in the southern Apennines: implications for seismic activity* - Boll. Soc. Geol. It., **125**, pp. 273-291.
- WARWICK G.T. (1952) - *Rimstone pools and associated phenomena* - Trans. Cave. Res. Group. GB., **2**, pp. 153-165.

Ms. ricevuto il 5 giugno 2007
 Testo definitivo ricevuto il 24 luglio 2007

Ms. received: June 5, 2007
 Final text received: July 24, 2007