

Rilevanze scientifico-ambientali presso le Terme San Giovanni di Rapolano Terme (SI): la Montagnola (“fissure-ridge” di travertino) e la mofeta del Bossoleto

Environmental peculiarities at Terme San Giovanni in Rapolano Terme (SI): the Montagnola (travertine fissure-ridge) and Bossoleto mofette

UGOLINI F. (*), MASSETTI L. (*), RASCHI A. (*), BROGI A. (**)

RIASSUNTO - Presso le Terme San Giovanni a Rapolano Terme (SI) si trovano due elementi geologici di notevole interesse scientifico: la Montagnola (dorsale fessurata di travertino) e la mofeta del Bossoleto. Entrambi sono legati all'attività geotermica che caratterizza l'intera Toscana meridionale e che dà luogo alla circolazione di notevoli volumi di fluidi idrotermali entro livelli crostali medio-superiori. La Montagnola è un rilievo allungato di circa 250 m, formato da travertino e caratterizzato dalla presenza di una fessura che lo attraversa longitudinalmente e dalla quale fuoriesce acqua termale (circa 40°C) molto salina con elevata componente di bicarbonato di calcio. La mofeta del Bossoleto, distante circa cento metri dalla Montagnola, è una dolina profonda circa 6 metri e ampia circa 80 metri, la cui peculiarità è la concentrazione atmosferica di anidride carbonica superiore alla media ambientale, talvolta limitante per le forme di vita.

Grazie a questa particolarità, la mofeta del Bossoleto è diventata negli anni un laboratorio scientifico per investigare gli effetti a breve termine e gli adattamenti di specie vegetali all'elevata concentrazione di anidride carbonica, ipotizzando quelli che, a grande scala, potrebbero essere gli effetti dell'aumento di anidride carbonica in atmosfera.

Quindi, l'area delle Terme San Giovanni è interessante non solo per il turismo termale, ma anche per il valore scientifico e paesistico di questi elementi. Queste peculiarità permettono anche di svolgere attività didattiche con gli studenti delle scuole locali, con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza del valore del loro territorio e la conoscenza di problematiche ambientali attuali.

PAROLE CHIAVE: Anidride carbonica, Effetto serra, Faglia, Termalismo, Travertino

ABSTRACT - Nearby the Terme San Giovanni SPA (Rapolano Terme, southern Tuscany), two spectacular geological featu-

res occur. These are strictly related to the geothermal activity that characterizes the whole southern Tuscany, providing the circulation of large volumes of hydrothermal fluids across the mid-upper crustal levels. The “Montagnola” is a travertine fissure-ridge 250 m long, made by travertine and characterized by a fissure running along its crest, from which thermal water (about 40°C) with high saline contents (mainly Ca-bicarbonate) is flowing. The Bossoleto mofette, located about 100 m from the fissure-ridge, consists of a doline about 6m deep and 80 m in diameter, characterized by high CO₂ concentration, often limiting life existence.

Due to this peculiarity, the mofette is used as natural laboratory to study either short term effects of high carbon dioxide on plants either the adaptation of vegetal species to high carbon dioxide concentrations, hypothesizing the effects of CO₂ increase at larger scale.

So far, the area of Terme San Giovanni is worthy for thermal tourism and for the scientific and landscape value of these elements. These peculiarities also allow didactic hands-on activities with local schools, aiming to raise in new generations the awareness of their territory value and the knowledge on current environmental issues.

KEY WORDS: Carbon dioxide, Green house effect, Fault, Thermalism, Travertine

1. - L'AREA DI RAPOLANO TERME

L'area di Rapolano Terme (STOP 1) dista circa 20 chilometri dalla città di Siena, in direzione Sud-Est, e si colloca al margine orientale del bacino di Siena-Radicofani (MARTINI & SAGRI, 1993), ovvero del territorio noto come Crete Senesi, lungo la

(*) Istituto di Biometereologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Giovanni Caproni 8, 50145 Firenze

(**) Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari

dorsale Monti del Chianti-Monte Cetona che attraversa parte della Toscana meridionale in direzione Nord-Sud (BERTINI *et alii*, 1991). Questa dorsale è costituita dai termini Triassico-Oligocene della Falda Toscana e da parte delle Unità Liguri e Subliguri ed è delimitata, verso Ovest, da una importante discontinuità tettonica, nota come faglia di Rapolano (BAMBINI *et alii*, 2010). Questa si estende per diversi chilometri in direzione Nord-Sud ed ha interferito con lo sviluppo del bacino neogenico di Siena-Radicofani, separando, a tratti, i depositi di riempimento con le rocce triassico-oligoceniche presenti lungo la dorsale dei Monti del Chianti-Monte Cetona in un periodo compreso tra il Pliocene inferiore ed il Pliocene medio (BROGI, 2004; BAMBINI *et alii*, 2010). La faglia di Rapolano è interrotta da faglie ortogonali o che la intersecano ad angolo acuto (fig. 1), la cui attività è perdurata fino a tutto il Pleistocene superiore. Queste hanno dato origine ai depositi di travertino che ricoprono gran parte dell'area comunale, e su cui sorge il paese stesso, così come alla presenza delle numerose sorgenti termali che, come testimoniano i ritrovamenti archeologici presso l'area di Campo Muri (STOP 1B), erano già attive fin dall'epoca dei romani, contribuendo all'economia locale (BROGI, 2004; BROGI & CAPEZZUOLI, 2009; BROGI *et alii*,

2010). Sono presenti, infatti, numerose sorgenti sparse in tutto il territorio, dalle quali fuoriesce acqua fino a circa 40°C spesso associata ad emanazioni di CO₂ (MINISSALE *et alii*, 2002; MINISSALE, 2004), due delle quali alimentano i due stabilimenti termali (Terme Antica Querciolaia e Terme di San Giovanni) utilizzati essenzialmente per scopi ludico-sanitari.

Presso lo stabilimento termale delle Terme di San Giovanni (qualche chilometro a Sud-Ovest di Rapolano Terme), sono presenti due importanti elementi geologici: la "Montagnola" (dorsale fessurata di travertino), un rilievo allungato di travertino, fessurato sulla sua sommità, in corrispondenza del quale sono allineate sorgenti di acqua termale, caratterizzate da una attività intermittente, che hanno permesso, nel tempo, l'accumulo di travertino (GUO & RIDING, 1998; BROGI & CAPEZZUOLI, 2009) e la "mofeta del Bossoleto", una dolina circolare di circa 80 metri di diametro (fig. 2).

2. - DESCRIZIONE DEGLI STOP

Gli elementi citati sopra, sono descritti in questo capitolo come STOP, la cui posizione è indicata nella mappa (fig. 3).

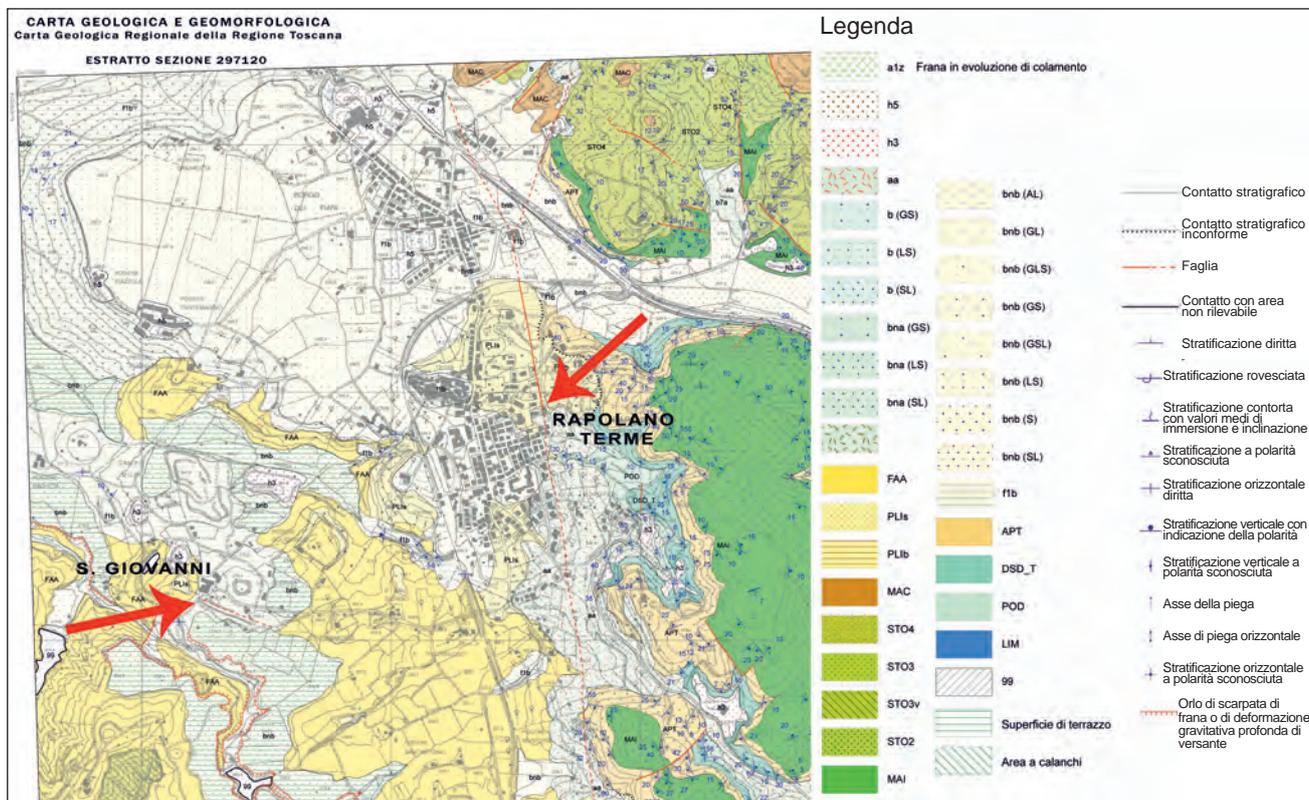


Fig. 1 - Estratto dalla carta geologica dell'area di Rapolano Terme in cui si nota la linea rossa tratteggiata che indica la linea di faglia di Rapolano. Altre linee tratteggiate rosse indicano altre faglie minori.

- Geological map of Rapolano Terme area. The red dashed line indicates the Rapolano fault. Other thinner red dashed lines indicate other minor faults.



Fig. 2 - Vista dall'alto degli elementi geologici che si trovano presso la località Terme San Giovanni, la Montagnola e la mofeta del Bossoleto.
 - Geological elements at Terme San Giovanni, Montagnola and Bossoleto mofette, seen from above.

2.1. - STOP 1 - RAPOLANO TERME E IL TRAVERTINO

I primi insediamenti nell'area di Rapolano sono di origine etrusca e romana poi, testimoniati dai reperti rinvenuti presso l'area di Campo Muri. Questo fa pensare che già all'epoca le sorgenti termali fossero attive e venissero sfruttate. Fu però durante il Medioevo, sotto la dominazione Senese, che Rapolano (STOP 1A) divenne il centro termale di riferimento per la cura di molte malattie. Trovandosi ai confini dello Stato senese, il Castello di Rapolano, denominato "castello di frontiera", fu più volte preso d'assalto da aragonesi e da fiorentini, fino all'ultima incursione del 1554 che portò alla sua distruzione ed al passaggio sotto il dominio della città di Firenze. Durante questo periodo di prosperità l'area di Rapolano Terme divenne un centro importante per l'attività estrattiva e la lavorazione del travertino, testimoniata da un documento risalente al 1597. Dal XIX secolo, il travertino è intensamente sfruttato e tutt'oggi costituisce, insieme alle terme, un'attività economica di rilievo. Oggi, la cava di travertino più vicina al paese di Rapolano Terme è quella di Campo Muri, presso

le Terme San Giovanni (STOP 1B).

Il travertino (fig. 4) è una roccia calcarea sedimentaria di ambiente continentale che si forma, in superficie, quando acque ricche in bicarbonato liberano l'anidride carbonica in atmosfera e conseguentemente causano la precipitazione del carbonato di calcio (FORD & PEDLEY, 1996). La deposizione del travertino è determinata da improvvise variazioni di pressione e/o di temperatura dell'acqua termale e non di rado dall'attività di organismi unicellulari che riescono a vivere in quelle particolari condizioni ambientali. Il travertino può depositarsi con tassi di sedimentazione molto elevati, fino a raggiungere, in alcuni casi 1 cm al giorno.

La deposizione del travertino avviene spesso in aree caratterizzate da vegetazione più o meno estesa; per questo motivo è frequente rinvenire all'interno del travertino resti fossili di piante. A seconda del materiale vegetale di supporto (alghe, briofite, micro e macrofite) si distingue e si classifica la tipologia di travertino che avrà un aspetto più o meno poroso e caratteristiche meccaniche diverse.

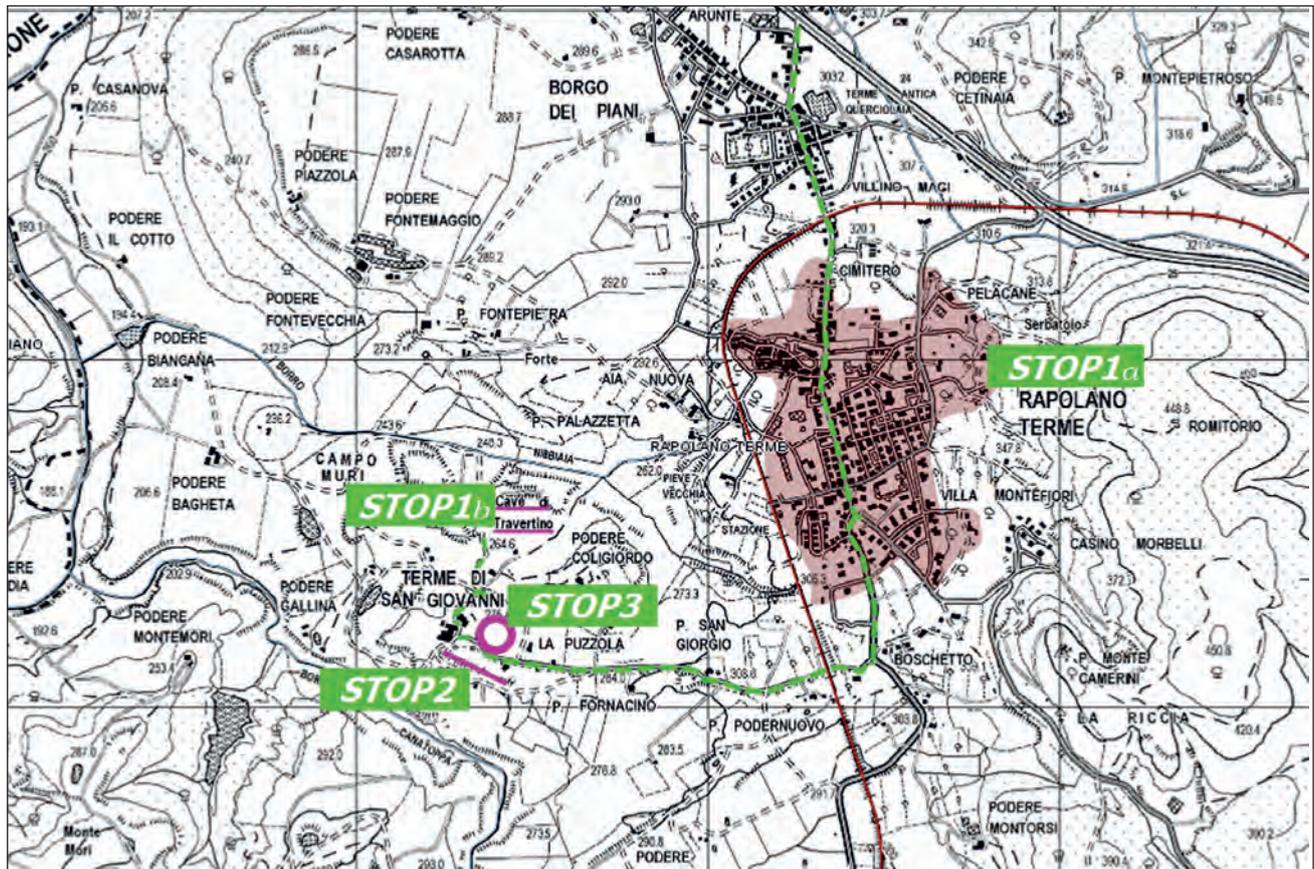


Fig. 3 - Mappa degli stop: STOP 1 A) il paese di Rapolano Terme e B) la cava di Campo Muri rappresentano il valore economico e storico-architettonico del travertino; STOP 2: la Montagnola, il rilievo fessurato esempio concreto di come si genera il travertino; STOP 3: la mofeta del Bossololetto, una dolina profonda pochi metri, risultato del fenomeno carsico, caratterizzata da elevate emissioni di anidride carbonica.

- Map of stop: STOP 1 A) Rapolano Terme and B) Campo Muri quarry represent the economical and historical-architectonic value of travertine; STOP 2: Montagnola fissure ridge, example of travertine formation. STOP 3: Bossololetto mofette, a few meters deep doline, formed for carsick phenomena, characterized by high concentration of atmospheric carbon dioxide.

Le sorgenti di acqua termale presenti nel territorio senese hanno generato, nel Quaternario, depositi di travertino caratterizzati da diverse tipologia di facies.

Nel comune di Rapolano Terme il travertino copre un'area di circa 14 km², con uno spessore massimo di circa 50 metri, ed è distribuito in quattro placche principali che si sono formate in corrispondenza della faglia di Rapolano (BROGI, 2004). Altri piccoli affioramenti si trovano in corrispondenza di faglie minori. L'attività estrattiva del travertino ha messo in luce, nel tempo, la parte interna di molti dei depositi di travertino ed ha reso pertanto possibile studiarne le caratteristiche deposizionali e geometriche, così come i rapporti con il substrato, principalmente costituito da sedimenti quaternari fluviali e/o pliocenici marini (cf. BROGI *et alii*, 2007; BROGI & CAPEZZUOLI, 2009; BROGI *et alii*, 2010). Sebbene per i travertini di Rapolano Terme manchino ancora studi stratigrafici, paleoambientali/paleogeografici di dettaglio, così come dati cronostatigrafici completi, alcuni studi paleontologici basati sul rinvenimento di fossili (come conchiglie di gasteropodi polmonati, ossa di mam-

miferi e soprattutto filliti), effettuati presso la cava attiva di Campo Muri (a Nord dell'area termale di San Giovanni, STOP 1 B) e presso altre cave, hanno permesso di riferire al Pleistocene superiore-Olocene (CARRARA *et alii*, 1998) la formazione del travertino locale.

Tuttavia la formazione del travertino è un processo ancora attivo e ne è un esempio la 'Montagnola' (BROGI & CAPEZZUOLI, 2009) (STOP 2).

2.2. - STOP 2 - LA MONTAGNOLA

La Montagnola (fig. 5) è un rilievo fessurato di travertino posizionato su un terrazzo fluviale. Esso è lungo circa 250 metri, largo circa 30 metri ed alto quasi 10 metri (BROGI & CAPEZZUOLI, 2009). Dati di sottosuolo indicano che la fissure-ridge si è sviluppata lungo la traccia di una faglia diretta che ha dislocato un terrazzo fluviale di età pleistocenica. Tale terrazzo, legato all'evoluzione idrografica del fiume Ombrone (che scorre vicino), poggia sopra ai sedimenti marini, argillosi, del Pliocene medio, ed è caratterizzato da depositi di travertino intercalati ai sedimenti fluviali.

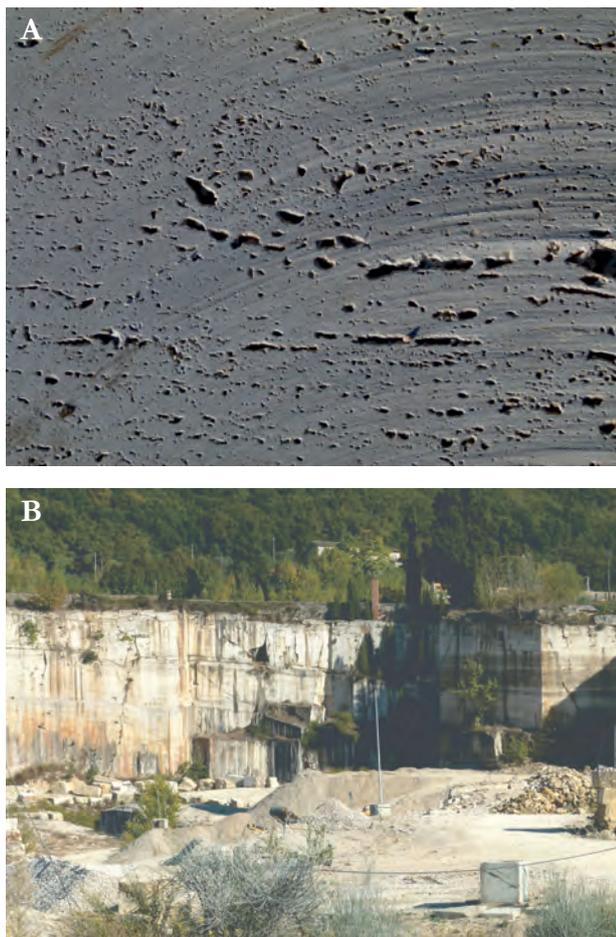


Fig. 4 - A) Esempio di travertino in cui si nota la porosità dovuta ad elementi di supporto su cui si deposita il carbonato di calcio. B) Cava di estrazione del travertino nell'area di Rapolano Terme.

- A) Example of travertine characterized by porosity due to elements of support on which calcium carbonate deposits. B) Quarry for travertine extraction in the area of Rapolano Terme.

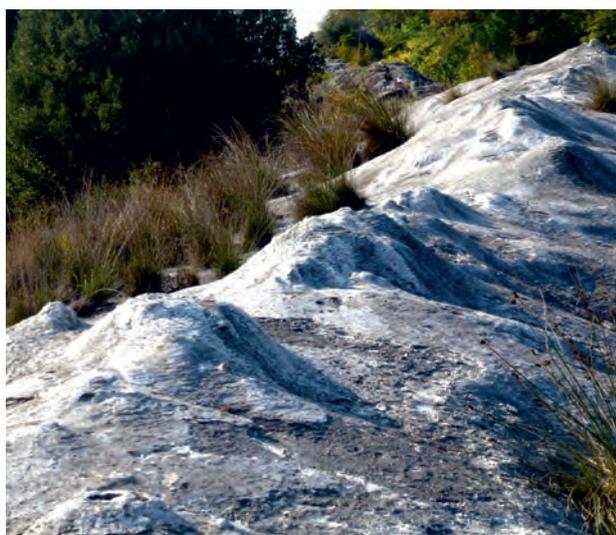


Fig. 5 - La Montagnola, rilievo fessurato di travertino in cui si notano i coni di emissione dell'acqua, da cui, tutt'oggi, si originano gli strati di deposito del carbonato.

- Montagnola, travertine fissure-ridge characterized by water emission cones which still emit water on its slope. Emitted water deposits calcium carbonate stratifications on its slopes.

La fessura longitudinale sulla sommità del rilievo varia da qualche millimetro ad un massimo di 30 cm di spessore nella parte centrale del rilievo. Nelle parti distali del rilievo invece la fessura appare quasi invisibile, coperta dai depositi più recenti. Da questa fessura fuoriesce acqua termale che ha favorito lo sviluppo (fig. 6 A), nel tempo, della dorsale. I fianchi del rilievo sono asimmetrici e presentano una pendenza variabile: la parte meridionale è più inclinata e meno irregolare rispetto alla parte settentrionale, meno scoscesa ed acclive. Tutto il corpo di travertino è caratterizzato dalla presenza di vaschette sospese e microterrazzi, di pochi centimetri di grandezza e con un margine di qualche millimetro.

Lungo la fessura centrale la risalita dell'acqua ha dato origine a coni allineati corrispondenti ad emergenze di acqua localizzate (fig. 6 B).

La formazione del rilievo è osservabile in loco, in un taglio trasversale localizzabile a Sud-Est della dorsale che è stato fatto in passato: si distinguono bene le stratificazioni di travertino parallele al piano di deposizione.

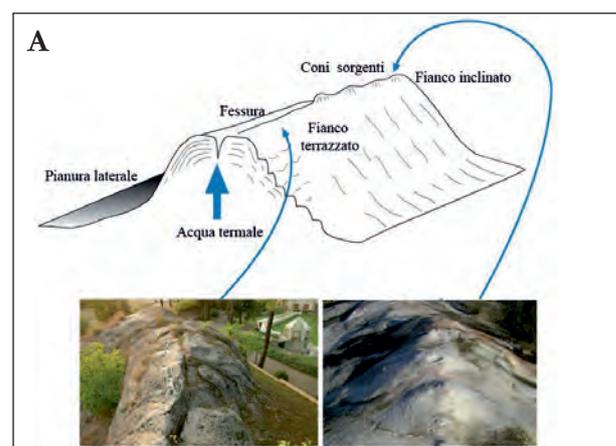


Fig. 6 - A) Origine della Montagnola: la risalita di acqua termale e la sua fuoriuscita dalla frattura longitudinale ha permesso la stratificazione di depositi di carbonato. B) In corrispondenza della frattura si formano inizialmente delle emergenze localizzate dalla forma conica.

- A) Origin of Montagnola: underground water comes up to the fissure and goes out forming travertine stratification. B) During the first stage of the fissure development, little cones are formed along it.

L'intera dorsale è caratterizzata da un settore dove il travertino ha una colorazione più chiara ed altri dove il travertino ha colorazioni più scure. La colorazione chiara del travertino corrisponde una deposizione più recente mentre la colorazione più scura indica invece quei settori dove il travertino è stato esposto agli agenti atmosferici da molto tempo favorendo lo sviluppo di licheni e muschi.

2.3. - STOP 3 - LA MOFETA DEL BOSSOLETO

Con il termine mofeta si intende l'emissione diretta di anidride carbonica proveniente da fratture del suolo dovuta a fenomeni di degassazione di masse magmatiche di centri eruttivi spenti. La mofeta del Bossoleto prende il suo nome dalla parola *Buxus* o bosso (*Buxus sempervirens* L.), una specie arbustiva sempreverde, a foglie ovali di piccole dimensioni, che probabilmente nel passato era molto presente nella vegetazione naturale, tutt'oggi costituita da specie tipiche del bosco termofilo (roverella, leccio, orniello, etc.), seppur l'intervento dell'uomo abbia inciso tutt'intorno.

La mofeta del Bossoleto consiste in una dolina, una depressione carsica del terreno, ampia circa 80 metri in diametro e profonda circa 6 metri (fig. 7). La sua presenza è testimoniata da uno scritto di Guglielmo Jervis risalente al 1868 in cui si dice "circa 100 metri dai bagni, havvi un cratere circolare del diametro di 80 metri su 5 di profondità detto la Mofeta, in un angolo del quale, trovasi una piccola grotta, dal cui suolo emana costantemente del gas acido carbonico; lo stesso ha luogo in tempi scioccali dal fondo del cratere".



Fig. 7 - La mofeta del Bossoleto è una dolina derivante dal collasso della roccia sottostante per degradazione del carbonato ad opera di acidi deboli. In essa la vegetazione presenta una distribuzione spaziale particolare che dipende dal gradiente di concentrazione di anidride carbonica.

- Bossoleto mofette is a doline formed for the collapse of bedrock due to the carbonate degradation under weak acids. Inside the doline, the vegetation is distributed according a gradient of carbon dioxide concentration.

La sua origine è presumibilmente legata al collasso strutturale del travertino. Il carbonato di calcio è una sostanza facilmente attaccabile da acidi deboli e la presenza di un'alta concentrazione di anidride carbonica nell'aria così come nell'acqua (di falda, e piovana) determinando la formazione di acido carbonico che potrebbe avere inciso significativamente sulla degradazione della roccia.

La mofeta del Bossoleto, di proprietà delle Terme San Giovanni SPA, per motivi di sicurezza, è circondata da un muro di recinzione e l'accesso è autorizzato per scopi scientifici e per visite guidate. Infatti, la peculiarità di questa dolina è data, come indica la citazione, dalle emissioni di gas velenosi, provenienti dal terreno e da una grotta poco profonda localizzata sul lato Sud della mofeta.

Alla fine degli anni '90 è stato fatto uno studio sulla tipologia di gas provenienti dalla grotta ed è stato osservato che il 96.1% del gas emesso è costituito da anidride carbonica (CO₂), il 3.4% da azoto (N₂), lo 0.45% da metano (CH₄), e lo 0.02% da solfuro di idrogeno (H₂S), mentre altri gas (idrogeno, elio, argon) si ritrovano in minime tracce (GUERRA & RASCHI, 2004). Eccetto la CO₂, gli altri gas riescono a disperdersi nell'aria e le loro concentrazioni all'interno della mofeta, si abbassano ulteriormente.

La composizione dell'aria all'interno della mofeta è quindi condizionata in massima parte dalla CO₂ e dalle condizioni micro ambientali. In particolari condizioni, soprattutto durante le prime ore del mattino, sono state registrate al livello del suolo concentrazioni di questo gas vicine al 75%.

La stabilità atmosferica che si registra di notte e al mattino, in assenza di irraggiamento solare, e la pesantezza del gas, provocano un accumulo del gas al fondo della dolina, mentre i moti convettivi diurni o la presenza del vento, provocano un rimescolamento dei gas che abbassa la concentrazione di CO₂. Nelle ore più calde delle giornate primaverili ed estive, la concentrazione di CO₂ si abbassa intorno a 1000-2000 ppm, una concentrazione tre, quattro volte maggiore rispetto quella ambientale (0,038%) ma che si misura per esempio in ambienti chiusi con molte persone (es. aule di scuola) e permette di accedere al sito senza incorrere in rischi.

Tali caratteristiche hanno reso la mofeta del Bossoleto l'ambiente ideale per svolgere sperimentazioni e ricerche scientifiche.

2.3.1. - La mofeta del Bossoleto e l'effetto serra

Pur essendo in concentrazioni traccia in atmosfera (media 0,038%), l'anidride carbonica, assorbendo la radiazione infrarossa emessa dal suolo, è il principale responsabile dell'effetto serra naturale. Dal 1750 a oggi la sua concentrazione ha registrato un aumento di circa 100 ppm, dovuto principal-

mente a emissioni antropogeniche, con il conseguente aumento del potere riscaldante (SOLOMON *et alii*, 2007) ed effetti sul clima e quindi sull'ambiente a scala locale e globale.

Al centro della mofeta del Bossoleto è presente una stazione di monitoraggio della CO₂ e di temperatura, costituita da una serie di sensori posti, a partire da un metro dal suolo, lungo una torre metallica di 6 metri, a distanza di 50 centimetri l'uno dall'altro. In cima alla torre metallica, ossia al livello del suolo, è posizionata una stazione meteorologica (fig. 8).

I dati provenienti da questi sensori permettono di descrivere la concentrazione del gas e indirettamente l'intensità dell'effetto serra all'interno della depressione. Per esempio, in una giornata tipo con condizioni che favoriscono la stabilità dell'aria, si registra un accumulo di gas durante la notte e una diminuzione brusca al mattino, quando aumenta l'irraggiamento all'interno della dolina (fig. 9A). Nel pomeriggio si registrano i valori minimi anche se sono sempre superiori a quelli ambientali normali.

L'andamento della concentrazione di anidride carbonica determina il riscaldamento dell'aria che, all'interno della dolina, arriva a superare anche di 10° C la temperatura ambientale (fig. 9B). Nella giornata considerata (30 Aprile 2010), la massima concentrazione di anidride carbonica ha fatto registrare una temperatura massima di 45 °C a 1 m da terra e di 25 °C a livello della stazione meteorologica.



Fig. 8 - Immagine della torre di supporto della rete di sensori e della stazione meteorologica al centro della mofeta del Bossoleto. Si nota anche il ristagno di aria umida al fondo della depressione.

- Picture of the tower supporting the net of sensors and the meteorological station inside the Bossoleto mofette. It is worthy to notice the moist air concentrated at the bottom of the depression.

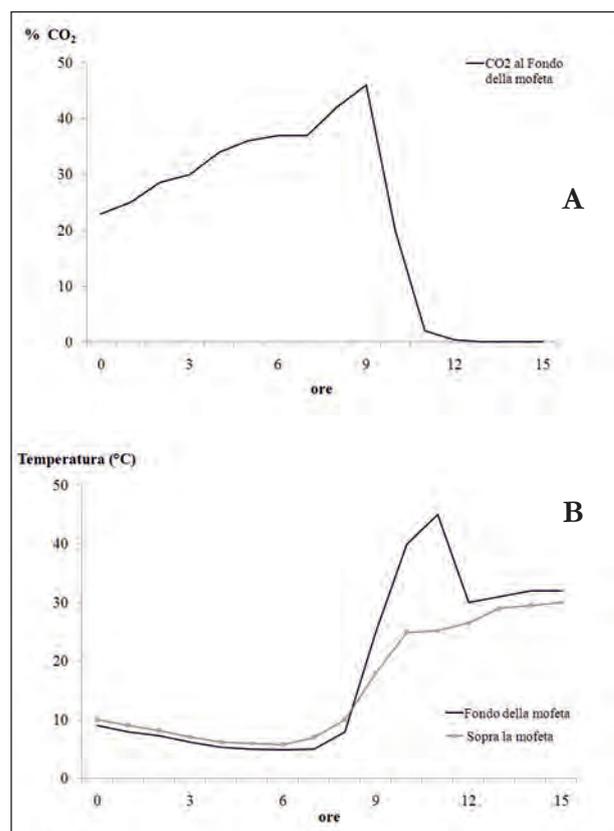


Fig. 9 - A) Andamento della concentrazione di anidride carbonica a un metro di altezza dal suolo in una giornata con stabilità di aria (30 Aprile 2010). B) Andamento della temperatura dell'aria a 1 metro dal suolo e in cima alla torre metallica (a livello dell'entrata della depressione).

- A) Concentration of carbon dioxide during 24 hrs at 1 m from the ground in a day with settled meteorological conditions (30rd of April 2010). B) Temperature during 24 hrs of the same day at two different height: 1 m from the ground and at the top of the tower (same height of the entrance of the depression).

2.3.2. - La mofeta del Bossoleto e le componenti biotiche

Le alte concentrazioni di anidride carbonica possono essere limitanti per molte forme di vita. Al di sopra del 7% l'uomo è soggetto ad asfissia e ad intossicazione già intorno allo 0,5% in esposizione prolungata. Per questo motivo sul fondo della dolina è facile incontrare i cadaveri di sventurati uccelli o mammiferi che non hanno potuto evitare l'asfissia.

Per quanto riguarda l'aspetto vegetazionale, all'estero della dolina e tutt'intorno al muro di recinzione è presente un parco costituito da esemplari di leccio (*Quercus ilex* L.) e altre specie tipiche dei boschi termofili mediterranei come roverelle (*Quercus pubescens* Willd.) e ornielli (*Fraxinus ornus* L.) che fanno ombra al parcheggio lungo la strada di accesso alle terme, e lo stesso bosso (*Buxus sempervirens* L.).

All'interno della mofeta del Bossoleto, la flora è stata classificata negli anni '90 da SELVI (1998) e all'epoca consisteva di 90 specie tra arboree, arbustive ed erbacce con presenza di specie tipiche di biotopi geotermali come quelle del genere *Agrostis* (fam. *Poaceae*).

La vegetazione inoltre si distribuisce secondo un gradiente di concentrazione dell'anidride carbonica (fig. 10) che vede, a livello del suolo, ossia al pari dell'ingresso alla mofeta dove c'è anche un maggiore accumulo di suolo, una concentrazione di anidride carbonica non limitante e la presenza delle stesse specie arboree che si ritrovano all'esterno della recinzione. Sul lato Sud, più ombroso, si trovano anche esemplari di specie più igrofile e mesofile come il pioppo tremulo (*Populus tremula* L.) e il carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.).

Lungo i fianchi della dolina, sono talvolta presenti rocce affioranti di travertino e zone di accumulo di suolo su cui cresce, in base al gradiente di anidride carbonica, una vegetazione erbaceo-arbustiva. Tra le specie erbacee, è presente la specie *Agrostis stolonifera* L., tipica di substrati calcarei e che, grazie alla variabilità genetica con cui risponde alla selezione naturale, tollera alte concentrazioni di anidride carbonica e situazioni di anossia anche a livello del suolo (SELVI & BETTARINI, 1999).

Il fondo della dolina, dove le alte concentrazioni di anidride carbonica sono più a lungo proibitive, è caratterizzato da un substrato scuro, ricco di materia organica e di frazione minerale di carbonato. In queste condizioni prevalentemente asfittiche, è presente una sola specie erbacea, la cannuccia di palude (*Phragmites australis* L.), e diverse specie di alghe e licheni. Tali condizioni comportano un tasso di decomposizione della sostanza organica molto lento, sia perché la stessa materia organica ha un alto contenuto di carbonio rispetto all'azoto (vista la ricchezza di anidride carbonica

nell'aria) (MIGLIETTA *et alii*, 1998), e quindi più difficilmente aggredibile dai microrganismi, sia perché le condizioni ambientali limitano la presenza di decompositori microbici e fungini.

Al fondo della dolina sono inoltre visibili tre risorgive di acqua termale (fig. 11), 'ribollente' dal gas.



Fig. 11 - Al fondo della mofeta del Bossoleto si possono osservare le risorgive specialmente nelle stagioni umide. L'acqua appare ribollire per la presenza di gas.

- At the bottom of the Bossoleto mofette, it is possible to observe some water resurgence, especially during the wet season. Water is rich in gas bubbles.

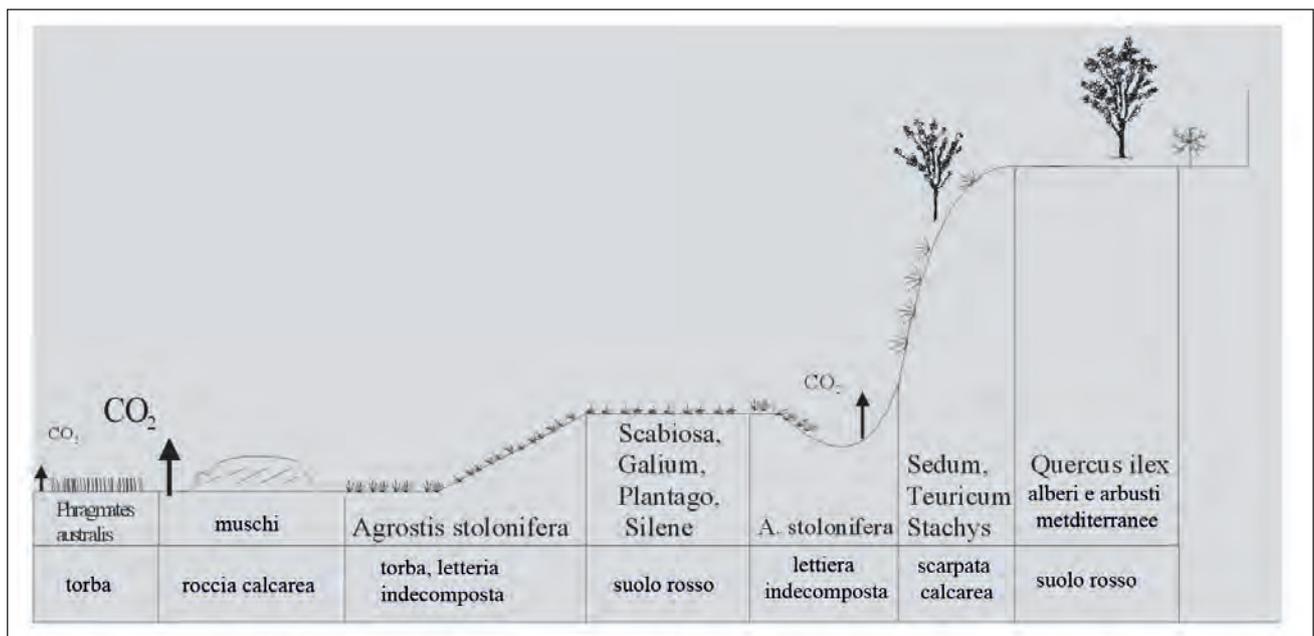


Fig. 10 - Schema della distribuzione spaziale delle specie vegetali in funzione della concentrazione di anidride carbonica (adattato da: GUERRA & RASCHI, 2004).

- Spatial distribution of vegetation species inside the Bossoleto mofette, depending upon the carbon dioxide concentration gradient in atmosphere.

2.3.3. - L'attività scientifica sulla vegetazione della mofeta del Bossoleto.

L'interesse mosso dagli scienziati verso lo studio degli effetti dell'effetto serra sugli ecosistemi naturali, ha permesso negli anni '90 e ancora oggi, l'attivazione di ricerche scientifiche con l'obiettivo di studiare il comportamento delle specie vegetali all'aumento dell'anidride carbonica in atmosfera.

La mofeta del Bossoleto ha rappresentato per gli scienziati italiani e stranieri un laboratorio a cielo aperto, come testimonia la targa gialla presso l'entrata che cita "Commissione delle Comunità Europee - Progetto Environment - Area Sperimentale "Il Bossoleto", Ambiente naturalmente arricchito in CO₂".

Lì sono stati studiati gli effetti dell'alta concentrazione di anidride carbonica sia a breve termine che a lungo termine per vedere le risposte di acclimatazione e gli adattamenti acquisiti dalle specie vegetali (fig. 12).

Gli studi effettuati sulle piante locali hanno evidenziato risposte specie-specifiche. Da quindici anni di ricerca scientifica è stato visto che l'arricchimento dell'aria in anidride carbonica determina solo iniziali incrementi del tasso di crescita della maggior parte delle specie vegetali (BARONTI *et alii*, 2007) e che le specie poi, sembrano acclimatarsi alle alte concentrazioni (OSBORNE *et alii*, 1997). La maggiore quantità di carboidrati prodotti inizialmente e accumulati nelle foglie, sembra inibire la formazione dell'enzima coinvolto nella fissazione dell'anidride carbonica e che determinerà la formazione del glucosio prima e dei carboidrati poi (CHENG *et alii*, 1998).



Fig. 12 - Sistema di fumigazione controllata utilizzato nelle prime ricerche scientifiche sull'effetto di elevate concentrazioni di anidride carbonica su specie vegetali.

- Controlled fumigation system used in former scientific researches about the effect of high concentrations of carbon dioxide on vegetal species.

Per quanto riguarda gli scambi di gas in entrata e in uscita a livello fogliare, un effetto fisiologico generalmente riconosciuto in molte specie presenti nella mofeta è la diminuzione della conduttanza stomatica (es. in roverella) che riduce la traspirazione e contribuisce a una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua. La conduttanza stomatica al vapor acqueo indica il grado di apertura degli stomi e durante il giorno, in condizioni ottimali, gli stomi sono aperti per permettere alla pianta di assorbire l'anidride carbonica (che verrà fissata con la fotosintesi clorofilliana per la produzione di glucosio), pur determinando una perdita di vapore acqueo. In alte concentrazioni di anidride carbonica, è stato osservato che il grado di apertura degli stomi è ridotto anche in condizioni ottimali. D'altronde, con un gradiente di concentrazione di CO₂ tra aria e interno della foglia molto alto, basta un grado di apertura ridotto per assorbire la quantità di gas necessaria. Inoltre, è stato osservato anche un effetto di riduzione della superficie evapotraspirante: il leccio per esempio presenta foglie più piccole (TOGNETTI *et alii*, 1996), mentre nella maggior parte delle specie esaminate non si è osservata riduzione della densità stomatica (BETTARINI *et alii*, 1998). Tuttavia, la riduzione della conduttanza stomatica o della superficie fotosintetizzante (le foglie) non genera un rallentamento dell'accrescimento. Tutt'altro, l'accrescimento radiale è stimolato sulle piante giovani ma tende a diminuire col tempo, soprattutto all'instaurarsi di fenomeni di competizione tra individui.

Alle ricerche in ambiente naturale, si sono affiancate sperimentazioni in ambiente controllato (ad esempio quelle che utilizzavano i sistemi di fumigazione FACE: *Free Air CO₂ Enrichment*) che hanno permesso di arrivare ad altri risultati, soprattutto sulle risposte a breve termine. Prati polifiti e specie orticole sono state oggetto di numerose ricerche che hanno evidenziato: un aumento della biomassa per le specie perenni, la riduzione della lunghezza del ciclo vegetativo nelle specie annuali dei prati polifiti (MIGLIETTA *et alii*, 2007), e una maggiore produzione di fiori e frutti per le specie orticole (MIGLIETTA *et alii*, 1998) anche se di minore qualità per la bassa presenza di sostanze azotate (AINSWORTH, 2008).

3. - DIVULGAZIONE: ATTIVITÀ DIDATTICA E VISITE GUIDATE

Le peculiarità descritte si prestano molto bene ad attività ed eventi di divulgazione scientifica in quanto sono di notevole valenza territoriale e circoscritti all'area delle Terme San Giovanni, quindi facilmente visitabili in un arco di tempo ristretto.

L'offerta didattica e le visite guidate alla mofeta

del Bossoleto vengono svolte previa richiesta all'Istituto di Biometeorologia - CNR di Firenze e autorizzazione rilasciata dalla proprietà.

Le visite guidate permettono ai visitatori di osservare i fenomeni e le rilevanze descritte nel capitolo precedente, avvalendosi anche di strumentazioni scientifiche o semplici sperimentazioni.

Nei pressi della Montagnola, oltre a spiegazioni sulla genesi del rilievo fessurato, è possibile per esempio andare alla ricerca di materiale vegetale fossilizzato (foglie, rametti), osservare la fuoriuscita di acqua dai coni emergenti e assistere quindi in diretta alla formazione del travertino.

All'interno della mofeta del Bossoleto, utilizzando un analizzatore di gas CO_2 portatile con termometro digitale, è possibile misurare la concentrazione di anidride carbonica e la temperatura dell'aria e, rilevando i valori in punti diversi della mofeta, è possibile verificare le variazioni di concentrazione del gas e di temperatura, riscontrando, in particolari condizioni, l'effetto serra. Le proprietà dell'anidride carbonica (gas pesante, incolore, inodore, ignifugo) possono essere testate attraverso semplici esperimenti (fig. 13).

Con le scuole del comprensorio, vengono spesso condotte attività a lungo termine che coinvolgono gli studenti come veri e propri scienziati.

Per esempio, negli anni sono state condotte delle sperimentazioni che hanno riguardato la crescita di specie vegetali all'interno della mofeta del Bossoleto, a confronto con una situazione di controllo (fig. 14).

Tra le specie erbacee sono state fatte sperimentazioni sull'orzo, misurando, alla fine della stagione vegetativa, la lunghezza dello stelo, la superficie fogliare, e la biomassa alla fine del trattamento.

Per le specie legnose, sono state effettuate delle attività sul leccio, confrontando la biomassa e la superficie fogliare di rami presi all'interno della mofeta del Bossoleto con rami presi all'esterno. In queste attività gli studenti hanno potuto i. interagire con i ricercatori, ii. applicare il metodo scientifico con la metodologia *Inquiry*, iii. essere inseriti in un contesto internazionale ad esempio con la partecipazione al progetto *Carboschools* (www.carboschools.org, 2009-2011).

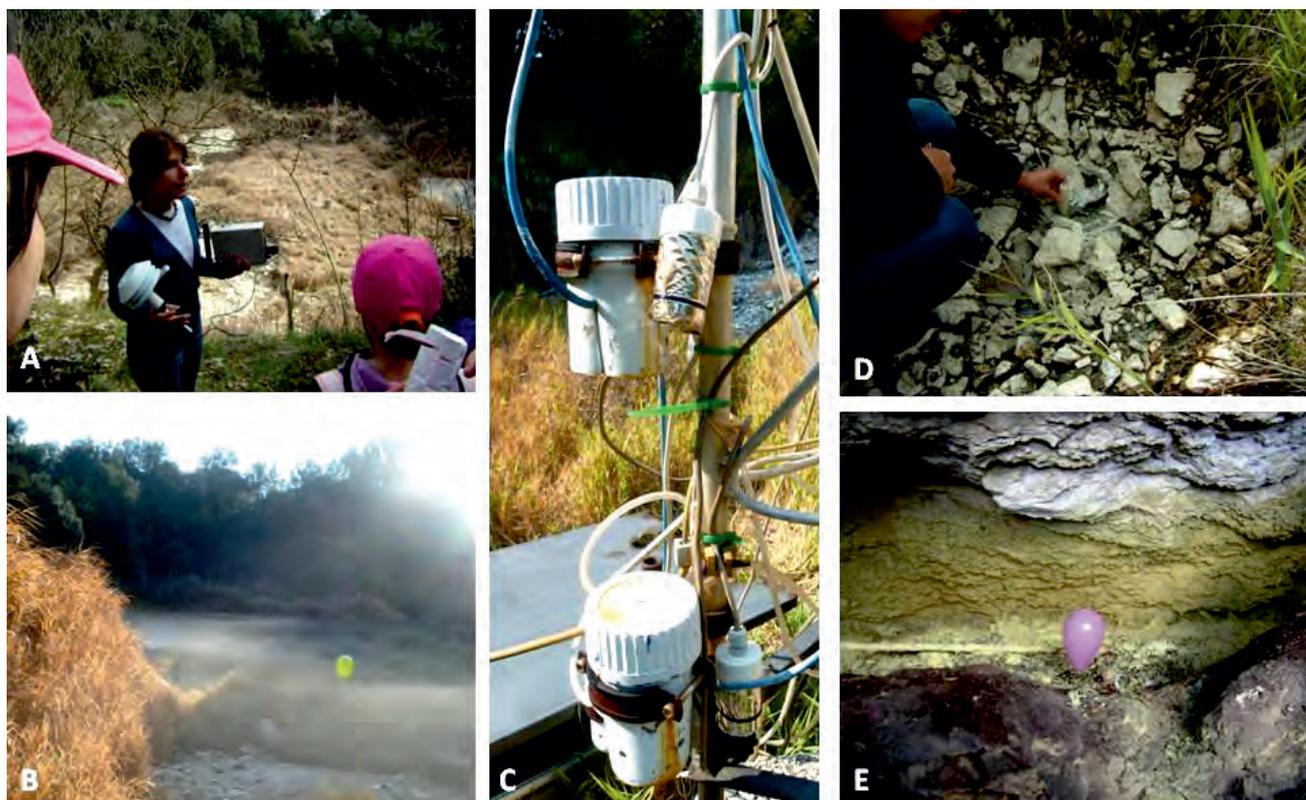


Fig. 13 - Semplici esperimenti dimostrano le proprietà dell'anidride carbonica. Ad esempio, A) avvicinando la fiamma della candela a una sorgente di anidride carbonica, si ferma la combustione; B) l'aria dentro un palloncino gonfiato a fiato avrà una densità maggiore rispetto all'aria di un ambiente aperto normale, e minore rispetto a quella dell'aria proveniente dalla sorgente di anidride carbonica, per cui lo si vedrà fluttuare; C) la temperatura dell'aria in condizioni di stabilità e alta concentrazione di CO_2 , evidenzierà un effetto serra dovuto al potere radiativo del gas trattenendo le radiazioni infrarosse.

- Simple experiments demonstrate the carbon dioxide properties. For instance, A) site visit and measure of atmospheric parameters (temperature, moisture, carbon dioxide concentration); B and E) Bossoleto air sometimes is denser than either an inflated balloon inside air or Bossoleto mofette outside, therefore, the balloon floats on the denser layer; C) the carbon dioxide concentration is monitored by sensors installed on a vertical transect on the tower. These data allow the quantification of the greenhouse effect inside Bossoleto mofette, due to the high concentrations of carbon dioxide and its high radiative forcing capacity; D) nearing the candle flame to the carbon dioxide source, its combustion ends.



Fig. 14 - Esperimenti *hands-on* a lungo termine sull'effetto dell'alta concentrazione di anidride carbonica su specie erbacee come l'orzo (A) e arboree come il leccio (B) cresciute dentro la mofeta del Bossoleto (trattato) e fuori (controllo), con l'elaborazione di reports finali.

- Long term hands-on experiments on the effects of high carbon dioxide on vegetal species, comparing growth traits of plants living inside and outside Bossoleto mofette, with final reports elaboration.

Inoltre, per gli insegnanti e i ricercatori queste attività permettono di raggiungere contemporaneamente due obiettivi: promuovere l'interesse e il divertimento nel fare scienza e favorire la conoscenza del proprio territorio. È riscontrabile infatti che molti studenti, pur vivendo a pochi chilometri dall'area Terme San Giovanni, non si sono mai fatti domande sull'origine della Montagnola e sono ignari della presenza della mofeta del Bossoleto.

4. - CONCLUSIONI

La Montagnola e la mofeta del Bossoleto sono due rilevanze del territorio senese che meriterebbero una maggiore valorizzazione. Non solo per la valenza scientifica descritta dei capitoli precedenti, ma anche perché rappresentano dei laboratori a cielo aperto dai quali i visitatori possono apprendere e conoscere meglio il territorio e i suoi elementi caratterizzanti: travertino e acque termali.

Fortunatamente la loro importanza è riconosciuta dalle scuole del comprensorio che, anche se con maggiore frequenza in passato, richiedono ai ricercatori la disponibilità a svolgere visite guidate e sperimentazioni per e con gli studenti. Queste attività, così come le visite guidate durante eventi speciali, permettono alle persone residenti e non, di conoscere l'ambiente a loro circostante, i fenomeni naturali che caratterizzano i tre stop e la metodologia di lavoro di molti scienziati che continuano a studiare le peculiarità della mofeta del Bossoleto. È dunque importante avere ulteriori opportunità di approfondimento della conoscenza e della sua divulgazione a un pubblico non esperto.

BIBLIOGRAFIA

- AINSWORTH E.A. (2008) - *Rice production in a changing climate: a meta analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration*. Glob. Change Biol., **14**: 1642-1650.
- BALDI A.M., CIVELI A. & MECARINI S. (2005) - *Nuova captazione alle Terme "Antica Querciolaia"*. Rapolano Terme (Siena): *Aquifer Vulnerability and Risk*, 2nd International Workshop, 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater. Reggia di Colorno, Parma 21-23 Settembre 2005.
- BAMBINI A.M., BROGI A., CORNAMUSINI G., COSTANTINI A. & LAZZAROTTO A. (2009) - *Nuovi dati litostratigrafici e biostratigrafici sulla Scaglia Toscana nella Toscana meridionale (area di Rapolano Terme)*. Ital. J. Geosci., **128** (3): 669-693.
- BAMBINI A.M., BROGI A., CORNAMUSINI G., COSTANTINI A., FORESI L.M. & LAZZAROTTO A. (2010) - *Geologia dell'area di Rapolano Terme in Provincia di Siena (Appennino Settentrionale)*. Ital. J. Geosci., **129** (3): 457-495.
- BARONTI S., MIGLIETTA F., RASCHI A., TOGNETTI R., VACCARI F.P. & MARACCHI G. (2007) - *Le sorgenti naturali di CO₂: quindici anni d'attività di ricerca scientifica. Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR*. <http://www.dta.cnr.it>.
- 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, **1**: 155-178.
- BETTARINI I., VACCARI F.P. & MIGLIETTA F. (1998) - *Elevated CO₂ concentrations and stomatal density: observation from 17 plant species growing in a CO₂ spring in central Italy*. Glob. Change Biol., **4**: 17-22.
- 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 Helveticae, **97**: 307-320.
- BROGI A. & CAPEZZUOLI E. (2009) - *Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure-ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy)*. Int. J. Earth Sci., **98**: 931-947.
- BROGI A., CAPEZZUOLI E., AQUE' R., BRANCA M. & VOLTAGGIO M. (2010) - *Studying travertines for neotectonics*

- investigations: Middle-Late Pleistocene syn-tectonic travertine deposition at Serre di Rapolano (Northern Apennines, Italy)*. Int. J. Earth Sci., **99**: 1383-1398.
- BROGI A., CAPEZZUOLI E. & GANDINI A. (2007) - *I travertini delle Terme di S. Giovanni (Rapolano Terme, Appennino Settentrionale) e loro implicazione neotettonica*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, **20** (2): 107-124.
- CARRARA C., CIUFFARELLA L. & PAGANIN G. (1998) - *Inquadramento geomorfologico e climatico ambientale dei travertini di Rapolano Terme (SI)*. Il Quaternario, **11**: 319-329.
- CHENG S.H., MOORE B. & SEEMAN J.R. (1998) - *Effects of short- and long-term elevated CO₂ on the expression of ribulose-1,5biphosphate carboxylase/oxygenase genes and carbohydrate accumulation in leaves of Arabidopsis thaliana (L.) Heynb.* Plant Physiol., **116** (2): 715-723.
- FANCELLI R. & NUTI S. (1975) - *Studio delle acque termali e minerali della parte orientale della Provincia di Siena*. Boll. Soc. Geol. It., **94** (1-2): 135-155.
- FORD T.D. & PEDLEY H.M. (1996) - *A review of tufa and travertine deposits of the world*. Earth-Science Rev., **41** (3): 117-175.
- GUERRA M. & RASCHI A. (2004) - *Field sight near Rapolano Terme (Siena, Tuscany). Relationship between tectonics and fluid circulation*. 32nd International Geological Congress 3 (D03):1-14 Florence-Italy, August 20-28, 2004, APAT, Roma 3- from D01 to P13.
- GUO L. & RIDING R. (1998) - *Hot-spring travertine facies and sequences, late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy*. Sedimentology, **45**: 163-180.
- JERVIS G. (1868) - *Guida alle acque minerali di Italia*. Loescher, Torino.
- MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993) - *Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines*. Earth Sciences Reviews, **34**: 197-233.
- MASSETTI L., UGOLINI F., RASCHI A., LAZZAROTTO A., COSTANTINI A., BROGI A. & BAMBINI A.M. (2012) - *I segreti del Bossoleto e della Montagnola. Un "laboratorio" di scienze all'aperto*. Pubblicazione divulgativa del progetto: "Didattica sull'effetto serra al Bossoleto", Bando Go Green 2011, Regione Toscana, pp. 26.
- MIGLIETTA F., BARONTI S., LANINI G.M., RASCHI A., ZALDEI A., VACCARI P.F., MARACCHI G., SELVI F. & TOGNETTI R. (2007) - *I sistemi CNR-FACE (Free Air CO₂ Enrichment) per lo studio sugli ecosistemi terrestri: tecnologie e risultati*. <http://www.dta.cnr.it>
- MIGLIETTA F., MAGLIULO V., BINDI M., CERIO L., VACCARI F.P., LODOCA V. & PERESSOTTI A. (1998) - *Free Air CO₂ Enrichment of potato Solanum tuberosum L.: development, growth and yield*. Glob. Change Biol., **4**: 163-172.
- MINISSALE A. (2004) - *Origin, transport and discharge of CO₂ in central Italy*. Earth-Science Rev., **66**: 89-141.
- MINISSALE A., VASELLI O., TASSI F., MAGRO G. & GRECHI G.P. (2002) - *Fluid mixing in carbonate aquifers near Rapolano (central Italy): chemical and isotopic constraints*. Applied Geochemistry, **17**: 1329-1342.
- OSBORNE C.P., LA ROCHE J., GARCIA R.L. & LONG S.P. (1997) - *Does long term elevation of CO₂ concentration increase photosynthesis in forest floor vegetation? Indiana strawberry in a Maryland forest*. Plant Physiol., **114**: 337-344.
- SELVI F. (1998) - *Flora of the mineral CO₂-spring "Bossoleto" (Rapolano Terme, Tuscany) and its relevance to ecological research*. Att. Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. ser. b, **105**: 23-30.
- SELVI F. & BETTARINI I. (1999) - *Geothermal biotopes in central-western Italy from a botanical point of view*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 14-133.
- SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. & MILLER H.L. (2007) - *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and USA.
- TOGNETTI R., GIOVANNELLI I., LONGOBUCCO A., MIGLIETTA F. & RASCHI A. (1996) - *Water relations of oak-species growing in the natural CO₂ springs of Rapolano (Central Italy)*. Ann. For. Sci., **53** (2-3), 475-485.