



Etruria*natura*

una finestra sul territorio

Periodico dell'Accademia dei Fisiocritici, Siena

Anno XII - 2017/2018

Numero speciale sulle acque termali

*Coltivare conoscenza
per creare coscienza*



ACCADEMIA DELLE SCIENZE DI SIENA DETTA DE' FISIOCRITICI



Etrurianatura
Accademia dei Fisiocritici onlus
piazzetta Silvio Gigli 2, 53100 Siena
tel. 0577 47002
www.fisiocritici.it
www.museofisiocritici.it

Registrazione

Autorizzazione del Tribunale di Siena
n. 747 del 19-1-2004

Direttore responsabile

Gianmichele Galassi

Responsabili scientifici

Roberto Fondi
Roberto Mazzei

Comitato editoriale

Roberto Fondi
Università di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Folco Giusti
Università di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Mattioli 4, 53100 Siena

Roberto Mazzei

Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e
dell'Ambiente, via Laterina 8, 53100 Siena

Luana Paulesu

Università di Siena
Dipartimento di Scienze della Vita,
via A. Moro 2, 53100 Siena

Claudia Perini

Università di Siena,
Dipartimento di Scienze della Vita,
via Mattioli 4, 53100 Siena

In copertina

Foto di Giovanni Bencini – viale Europa,
comparto "I Pini", 42 - 58022 Follonica (GR)

Retro copertina

Foto di Giovanni Bencini



Realizzazione editoriale
Betti s.r.l.
Siena (Italia)
www.betti.it
redazione@betti.it

Nessuna parte di questa rivista può essere
riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o con
qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro
senza l'autorizzazione scritta dei proprietari dei
diritti e dell'editore. L'editore è a disposizione
degli eventuali detentori di diritti che non sia stato
possibile rintracciare

© 2018 Accademia dei Fisiocritici Onlus, Siena

ISSN 2282-2607

Sommario

Presentazione

Contributi

- 10 Geotermia nella Toscana meridionale: una risorsa importante da gestire con cura
Marcello Viti, Enrico Tavarnelli
- 25 *Aqua et igni*: scienza e senso del sacro delle acque termali per gli Antichi
Carmelo Cannarella, Valeria Piccioni
- 39 Terapie termali nel trattamento delle malattie reumatiche: utopia o realtà?
Antonella Fioravanti, Sara Tenti, Sara Cheleschi, Mauro Galeazzi
- 50 Gli habitat, la flora e la fauna degli ambienti termali della Toscana meridionale
Leonardo Favilli, Andrea Benocci, Claudia Angiolini, Giuseppe Manganeli
- 56 La risorsa geotermica nella Toscana meridionale, con particolare riferimento alla bassa entalpia
Giacomo Biserni, Massimo Salleolini
- 76 Le acque delle miniere nelle Colline Metallifere
Alessandro Masotti
- 90 Le zone termali marine: un modello per studiare gli effetti dell'acidificazione degli oceani su popolazioni naturali
Ilaria Corsi, Elisa Bergami

La parola all'immagine

- 98 L'Uomo incontra l'armonia della Natura nelle colline senesi
Giovanni Bencini

Il punto della situazione

- 108 Le acque termominerali di Petriolo
Massimo Fanti, Massimo Salleolini
- 121 «Heri mattina principasemo a tuore el bagno». Quando i Gonzaga venivano a Petriolo
Riccardo Bassani
- 141 Il recupero dei Bagni di Petriolo
- 141 Bagni di Petriolo, un grande impegno di Italia Nostra
Marianita Signorini
- 142 Un esperimento di conservazione e valorizzazione
Adriano Paolella
- 146 Terme di pontefici e imperatori
Anna Guarducci, Andrea Arrighetti, Barbara Gelli
- 147 Risultati e prospettive per la ricerca archeologica
Serena Massa, Susanna Bortolotto, Piero Favino, Andrea Garzulino
- 149 Le varie fasi del recupero
Giovanni Minutoli, Stefano Bertocci
- 151 Un progetto per ricreare l'armonia del luogo
Massimo Bettini

Schede naturalistiche

- 154 La Tomba etrusca delle foglie d'oro nei pressi dell'area termale di Petriolo: tra Archeobotanica e Storia
Claudio Milanesi

Presentazione

Il filosofo Talete riteneva che l'acqua rappresentasse l'elemento generatore del cosmo intero, il cosiddetto Archè. Senza spingersi così in alto, essa è stata comunque considerata nel tempo uno degli elementi principali del cosmo. Prove in questo senso si rinvengono nella cosmogonia indiana, in quella assiro-babilonese e persino nel *Genesi* biblico. In molte civiltà antiche le sorgenti, i laghi, i fiumi e le altre espressioni dell'acqua divenivano addirittura oggetto di culto e di sacrifici propiziatori. Un esempio è fornito dal Gange, fiume adorato dagli Indù come divinità: per questo popolo non si può avere una vita completa senza bagnarsi almeno una volta nelle sue acque; inoltre, solo bevendo queste ultime l'anima ha la possibilità di salire in cielo. La sacralità era spesso associata all'attività terapeutica; è ben noto, infatti, come l'immersione nei fiumi Giordano e Nilo avesse l'intento di curare sia i mali spirituali che quelli corporei. Si rileva, infine, che nell'esperienza ellenica i templi di Asclepio, dio della medicina, sorgevano sempre nelle vicinanze di una sorgente di acqua fresca e pura.

L'acqua rappresenta il bene primario per eccellenza, quello che dona e garantisce la vita sul nostro pianeta. Purtroppo, molto spesso ce ne dimentichiamo e commettiamo dei veri e propri "sacrilegi" nei suoi confronti.

Dal grande panorama dei "volti" che l'acqua assume, per questo numero 12 di *Etrurianatura* ne è stato scelto uno del tutto particolare, anche se conosciuto fin dai tempi più antichi: quello termale. In estrema sintesi si parla di acque termali quando queste, dopo aver subito un riscaldamento in strati rocciosi profondi, risalgono attraverso fratture per fuoriuscire a temperature in genere superiori ai 20°C (quando sono sotto forma di vapore, questo può condensare dando origine ad un *geyser*). La conoscenza della tipologia delle acque, non solo dal punto di vista della temperatura ma anche da quello delle proprietà chimiche, chimico-fisiche e terapeutiche (acque salse o cloruro-sodiche, sulfuree, arsenicali-ferruginose, bicarbonate, solfate, carboniche, salso-bromo-iodiche), produce spesso notevoli influssi benefici accompagnati da risvolti socio-economici di grande rilievo. Questi sono i principali motivi per cui in corrispondenza dei punti di uscita dell'acqua calda sono state edificate nei secoli le strutture termali.

La Toscana, come del resto gran parte del nostro Paese, è ricca di terme con acque dalle proprietà uniche e per questo molto frequentate e famose. Fra l'altro, molte di queste sono conosciute fin dall'epoca etrusca e quindi in grado di offrire un "sapore" del tutto particolare. A titolo di esempio, tra quelle della Toscana meridionale se ne ricordano alcune con le loro caratteristiche più significative:

- *le Terme di Saturnia*. Le diverse sorgenti di acqua calda, situate a pochi chilometri dall'omonimo centro etrusco (Comune di Manciano, Provincia di Grosseto), alimentano le terme con un ottimale ricambio (la portata è di circa 800 litri al secondo). Le acque, di natura sulfurea, sgorgano ad una temperatura di 37,5 °C e posseggono rinomate proprietà terapeutiche con effetti benefici a livello epidermico, respiratorio e motorio. Quelle che escono dallo stabilimento termale si canalizzano in un rio e vanno a formare, per la morfologia del terreno, le Cascate del Mulino; dopo un salto principale le acque offrono, a diversi livelli, piscine naturali liberamente fruibili (Fig. 1).

- *le Terme di Chianciano*. Ubicate nella cittadina omonima della Provincia di Siena, rappresentano una struttura medico-sanitaria di grande importanza che utilizza acque di sorgenti (Acqua Santa, Ac-



Fig. 1. Terme libere di Saturnia: Cascate del Mulino (dette anche Cascatelle o Cascate del Gorello).



Fig. 2. Terme libere di Petriolo.

(Terme di Petriolo e Petriolo Spa Resort), esse sono utilizzate principalmente per la cura dei disturbi del sistema respiratorio. Le acque calde di Petriolo erano sicuramente conosciute già in epoca romana; il primo complesso termale in muratura, dinanzi alla sponda settentrionale del Farma (Comune di Monticiano), risale tuttavia agli inizi del Quattrocento. Ed è proprio durante il Rinascimento che le terme assunsero un notevole prestigio, tanto che vi si recarono personaggi della famiglia dei Medici e di quella dei Gonzaga, nonché papa Pio II (Enea Silvio Piccolomini).

- *Le Terme di Rapolano.* Rapolano è una località della Provincia di Siena che dispone di due stabilimenti termali: quello di San Giovanni e quello dell'Antica Querciolaia (vicino al centro abitato). La portata cospicua delle sorgenti assicura un ricambio continuo delle acque. Queste, già note al tempo degli Etruschi per le loro proprietà benefiche (contengono solfato di magnesio, calcio e zolfo), sgorgano a temperature variabili da 22 a 40°C. Oggi sono ritenute ideali per l'azione terapeutica su affezioni dell'apparato osteoarticolare e per curare patologie respiratorie e cutanee. Sono utilizzate, inoltre, per attenuare la rigidità muscolare e conferire maggiore elasticità ai tessuti.

qua Fucoli, Acqua Santissima e Acqua Sillene) a diverse temperature (da 10 a 38 °C) e proprietà curative. Conosciute da secoli per le loro qualità, esse sono consigliate per le cure del fegato, dell'apparato respiratorio, di quello gastrointestinale e delle vie biliari.

- *le Terme di Petriolo (o Bagni di Petriolo).* La sorgente che alimenta le terme si trova lungo il corso del Fiume Farma (Valle dell'Ombrone), al confine tra i comuni di Monticiano (Provincia di Siena) e Civitella Paganico (Provincia di Grosseto). Le acque, che sgorgano a temperature fino a 43 °C, sono ricche di zolfo; vi si rinvencono inoltre anidride carbonica libera, calcio, fluoro e ioni cloruro, solfato e idrogeno carbonato (tali caratteristiche le classificano come solfidriche, salso-solfato-bicarbonato-alcalino terrose-ipertermali). Fruibili sia liberamente (in una serie di vasche esterne; Fig. 2) che presso gli stabilimenti privati

Da rilevare che l'acqua calda può uscire dagli strati terrestri in condizioni non solo aeree (termalismo) ma anche sottomarine (idrotermalismo). In genere le sorgenti idrotermali si formano lungo le dorsali medio - oceaniche (ad esempio quella del Pacifico orientale e quella Medio Atlantica) e cioè in quei luoghi dove due placche tettoniche divergono e si forma nuova crosta terrestre, ma le soluzioni calde possono essere emanate anche da un *rift* attivo sommerso come nel caso del Mar Rosso. L'acqua che esce dai camini o dalle bocche idrotermali, principalmente marina (discende nel sistema idrotermale attraverso fratture e sedimenti porosi degli strati vulcanici) e magmatica (è rilasciata dal magma in risalita), può raggiungere temperature fino

a 400 °C e quindi in netto contrasto con la temperatura di 2 °C tipica delle profondità oceaniche. Siccome l'alta pressione a cui è soggetta espande significativamente il delta termico nel quale rimane liquida, essa non bolle. Quando i due tipi di acqua entrano in contatto, i sali minerali disciolti precipitano ed il materiale formatosi si posa sulla sommità del camino; talvolta vengono a crearsi, in questa maniera, strutture più o meno circolari ed alte diversi metri (anche 60 m). In funzione del colore dei fluidi che emettono, le strutture a camino sono chiamate fumarole nere o *black smokers* (le particelle hanno un alto tasso di zolfo o di solfuri) e fumarole bianche o *white smokers* (le particelle sono più chiare e in genere contengono bario, calcio e silicio) (Figg. 3, 4). Le fumarole sottomarine hanno assunto una notevole importanza in campo industriale per il contenuto in minerali dei fanghi che le caratterizzano.

Sui camini idrotermali sono state scoperte più di 300 specie

(si tratta prevalentemente di anellidi, vermi tubo, gasteropodi e crostacei) per cui va da sé che, nonostante le condizioni proibitive per temperatura, pressione e mancanza di luce, la vita (Fig. 5) vi è ancora possibile (questo fatto ha portato gli scienziati a formulare una nuova teoria sull'origine della vita sulla Terra). La



Fig. 3. Una fumarola nera (*black smoker*).



Fig. 4. Una fumarola bianca (*white smoker*).

fonte primaria di energia è da considerarsi proprio l'acqua che esce dagli sfiati idrotermali in quanto supporta, con i suoi sali minerali, una amplissima popolazione di batteri chemioautotrofi; attraverso il processo di chemiosintesi questi ultimi usano i composti dello zolfo (in particolare il solfuro di idrogeno) per la produzione di materiale organico, il quale va ad alimentare le diverse comunità.

Nell'ambito del Mediterraneo sono state scoperte fumarole che la comunità scientifica ha scelto come modello per analizzare l'acidificazione delle acque (fenomeno sempre più diffuso per i cambiamenti climatici globali) e gli effetti conseguenti, al fine di comprendere meglio gli "scenari" che potranno venire a crearsi sul nostro pianeta.

Il quadro suggestivo che questo numero di *Etrurianatura* apre sull'origine, il significato e l'uso delle acque termali, stimola il lettore verso aspetti scientifici, curativi e storico-sociali. Pur riferendosi a zone relativamente ristrette della Toscana meridionale, esso evidenzia il ruolo e la grande importanza che la geotermia ha assunto sempre più nel tempo. Questa espressione della conoscenza giustifica, fra l'altro, la recente riscoperta di Italia Nostra dell'area termale di Petriolo volta ad un nuovo sviluppo.

Buona lettura!

Il Comitato editoriale



Fig. 5. Una colonia di vermi tubo radicata sul basamento di un *black smoker*.

Contributi



Geotermia nella Toscana meridionale: una risorsa importante da gestire con cura

Marcello Viti, Enrico Tavarnelli

Università di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, via Laterina, 8 - 53100 Siena
marcello.viti@unisi.it / enrico.tavarnelli@unisi.it

La geotermia in Toscana meridionale

Sin dall'epoca della civilizzazione etrusca, nella Toscana meridionale e non solo sono conosciuti ed apprezzati sia gli abbondanti depositi di minerali di ferro, mercurio e rame (da cui deriva il termine di Colline Metallifere), sia le numerose sorgenti di acqua calda. Lo sfruttamento moderno dell'area geotermica toscana risale al 1777 quando il chimico austriaco Uberto Hofer, al servizio del Granduca di Toscana, scoprì l'acido bórico nelle pozze di fango bollente (lagoni) situate nei dintorni di Pomarance. Neutralizzando l'acido bórico (H_3BO_3) con il carbonato sodico (Na_2CO_3) Hofer ottenne il cosiddetto borace ($Na_2B_4O_7$), ossia la preziosa merce nota come *tinkal* (importata per secoli dall'Asia centrale) ed usata nell'industria tessile, del vetro, della porcellana e in farmacia.

Dopo un primo tentativo da parte del medico senese Paolo Mascagni (1779), l'estrazione dell'acido bórico dai lagoni cominciò nel 1812 per iniziativa del francese Francois Jacques de Larderel e il successo ottenuto consentì lo sviluppo del comprensorio e la nascita di Larderello. Durante tutta la prima fase di questo sviluppo si determinò il pressoché totale disboscamento dell'area, dato che le soluzioni boriche dovevano essere riscaldate e concentrate mediante la combustione del legname. Per ovviare a questo inconveniente, dal 1827 cominciò l'impiego del calore fornito dal vapore geotermico: era nata la Regione boracifera toscana, che per molti decenni sarebbe rimasta ai vertici della produzione mondiale di prodotti chi-

mici come l'acido bórico, il perborato di sodio, il carbonato di ammonio ed il talco in polvere.

Nel 1903 il fiorentino principe Pietro Ginori Conti, genero del conte de Larderel, divenne il direttore generale della Società Larderello e nel rilanciare l'attività industriale avviò, per la prima volta, la produzione di energia elettrica mediante l'uso del vapore geotermico. L'industria geotermoelettrica, nata a Larderello nel 1904, si è sviluppata nel corso XX secolo ed è servita come esempio per le altre aree geotermiche del mondo (Di Pippo, 2015).

Attualmente, la conversione in elettricità dell'energia dei fluidi del sottosuolo è un settore industriale in forte crescita a scala globale. La potenza installata negli impianti geotermoelettrici attivi sul pianeta era di 10.888 MW (1MW=10⁶ Watt) nel 2010 e di 12.729 MW nel 2015, con una previsione di ben 21.000 MW per il 2020 (Bertani, 2016). Nel 2015 l'Italia occupava la sesta posizione per potenza installata (920 MW, pari al 7% del totale mondiale), seguendo gli Stati Uniti, le Filippine, l'Indonesia, il Messico e la Nuova Zelanda. Sebbene alcuni progetti di sfruttamento siano stati avviati in altre regioni italiane, la produzione elettrica è da sempre interamente concentrata nella Toscana meridionale (aree di sua pertinenza appartenenti alle province di Grosseto, Pisa e Siena) dove sono ubicati i campi geotermici di Larderello-Lago (580 MW), Travale-Radicondoli (220 MW) e Piancastagnaio-Bagnore (120 MW). Gli impianti di produzione, gestiti dalla società ENEL Green Power s.r.l., sono

collocati in 8 Concessioni della Regione Toscana che occupano un'area di circa 490 km² (Fig. 1). È importante ricordare che la medesima regione ha concesso nel 2012 ben 34 permessi di ricerca a 12 differenti società commerciali, per una superficie complessiva di 3.440 km² nelle province di Firenze, Grosseto, Livorno, Pisa, Prato e Siena. Quest'ultimo dato sottolinea l'interesse che la Toscana suscita negli operatori dell'industria geotermoelettrica, anche in zone differenti dalle aree tradizionali di sfruttamento.

Dopo una breve rassegna sull'evoluzione geologica della Toscana meridionale, in questo articolo verranno descritte le principali caratteristiche delle risorse geotermiche delle province di Siena, Grosseto, Pisa e Livorno, non solo in termini di qualità delle stesse ma anche del possibile impatto ambientale connesso alle attività di sfruttamento.

Evoluzione geologica della Toscana meridionale

La Toscana meridionale occupa il settore sud-occidentale dell'Appennino settentrionale, una catena orogenica nata dalla scomparsa dell'antico Oceano Tetide e dal conseguente scontro fra i margini continentali europeo ed africano. Circa 250 milioni di anni fa i continenti erano riuniti nell'unico supercontinente Pangea, delimitato ad est dal golfo oceanico detto Tetide permanente (Fig. 2). A seguito dell'instaurarsi nel Triassico (tra 225 e 200 milioni di anni fa) di un processo di frammentazione del supercontinente, un ramo di neoformazione dell'Oceano Tetide (Neotetide) iniziò ad espandersi verso i quadranti occidentali; ciò determinò l'assottigliamento della crosta continentale, la lacerazione del supercontinente e la formazione delle grandi masse continentali Gondwana a



Fig. 1. Ubicazione dei campi geotermici della Toscana meridionale (da Minichilli *et al.*, 2012). Sono indicate le aree geotermiche settentrionale (Larderello-Lago e Travale-Radicondoli) e meridionale (Piancastagnaio-Bagnore). I comuni indicati in grigio appartengono al Consorzio per lo Sviluppo delle Aree Geotermiche (COSVIG S.c.r.l.), una società per lo sviluppo economico dei comprensori geotermici promossa dalla Regione Toscana con sede a Radicondoli (Siena).

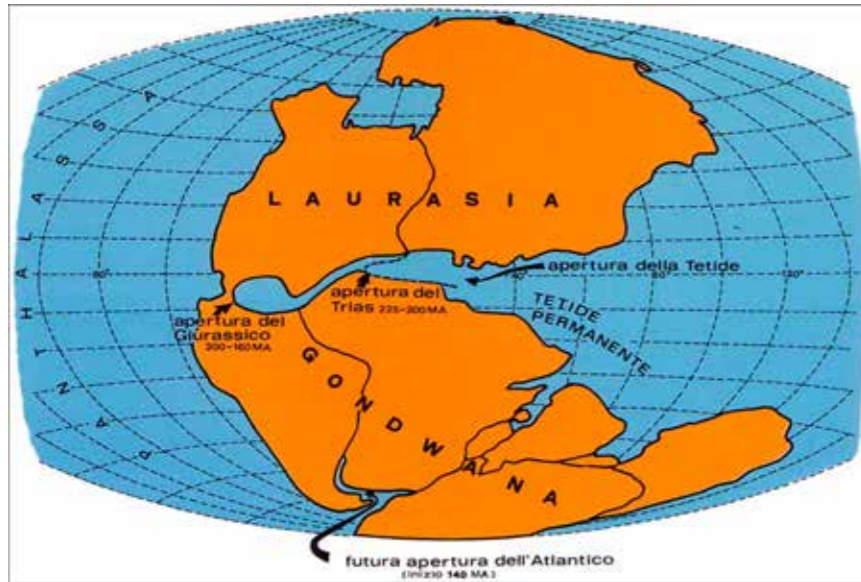


Fig. 2. Il supercontinente Pangea all'inizio dell'era Mesozoica (da Aubouin et al., 1980, in Lazzarotto, 1993).

sud e Laurasia a nord (Aubouin, 1980) attraverso un movimento di allontanamento di queste ultime (per spiegare questo processo, all'inizio del XX secolo il meteorologo tedesco Alfred Wegener aveva formulato la Teoria della Deriva dei Continenti).

Il ramo Neotetide raggiunse la sua massima espansione nel Giurassico superiore (circa 150 milioni di anni fa); da questo momento e nel corso del Cretacico e del Terziario antico, l'apertura dell'Oceano Atlantico condusse ad una generale riorganizzazione dei movimenti relativi fra Laurasia e Gondwana e all'individuazione delle due Americhe (meridionale e settentrionale), dell'Africa e dell'Europa. L'apertura dell'Oceano Atlantico, da sud verso nord, determinò inoltre un riavvicinamento dei margini continentali europeo ed africano, nonché un restringimento del Neotetide. Dal Cretacico terminale e per tutto il basso Terziario questi margini continentali entrarono in collisione dando origine a numerose catene orogeniche, fra le quali le Alpi e l'Appennino.

La catena appenninica si sviluppò inizialmente attraverso un prisma di accrezione, costituito

da frammenti di crosta oceanica (relietti del Neotetide giurassico) ricoperti da sedimenti prevalentemente pelagici del Giurassico superiore - Cretacico, che andò a sovrapporsi per obduzione¹ al margine continentale africano. Con la collisione fra i margini europeo ed africano, riconducibile nel settore toscano dell'Appennino all'Oligocene superiore, si ebbe il coinvolgimento nel processo orogenico del basamento africano paleozoico e delle successioni sedimentarie che si erano deposte sul margine continentale durante l'intervallo Triassico - Cenozoico e ciò portò la catena a crescere. Il procedere del processo di collisione continentale determinò lo scollamento di parte delle coperture sedimentarie lungo uno spesso livello evaporitico (Triassico superiore), l'individuazione di distinte unità tettoniche separate da superfici di sovrascorrimento a basso angolo immergenti verso ovest e la loro traslazione verso i quadranti nord-orientali. L'architettura della catena appenninica risultava quindi caratterizzata, durante l'Oligocene superiore, da unità tettoniche oceaniche

1. L'obduzione è un processo per cui brandelli di crosta oceanica sono spinti verso l'alto, anziché sprofondare verso il basso come si verifica di norma nelle zone di subduzione, e sovrascorrono il margine di contatto con altra crosta continentale o oceanica; le rocce caratteristiche della crosta oceanica obdotta sono le ofioliti, consistenti di basalto, gabbro, peridotite, dunite ed eclogite.

(Unità Liguri: in prevalenza ofioliti e loro originarie coperture) sovrapposte a unità tettoniche di derivazione continentale africana (Unità Subliguri, o Austroalpine, e Toscane: elementi del basamento paleozoico e altri più esterni in massima parte rappresentati da porzioni scollate della copertura sedimentaria mesozoica - cenozoica) (Fig. 3).

A partire dal Miocene Inferiore, la catena appenninica cominciò a registrare le manifestazioni embrionali di un collasso tardo - orogenico caratterizzato dallo sviluppo di famiglie e sistemi di strutture con carattere distensivo. Queste ultime andarono a sovrapporsi alle preesistenti strutture di tipo compressivo, quali pieghe e sovrascorrimenti, determinando una forte scompaginazione degli originari rapporti fra le unità tettoniche che si erano individuate ed accavallate durante le fasi di convergenza e di collisione continentale.

Inizialmente, il collasso orogenico si espletò mediante l'individuazione di faglie dirette a basso angolo che collegavano importanti orizzonti di scollamento posti rispettivamente alla sommità ed alla base delle Unità Toscane; in particolare nella Toscana meridionale queste faglie dettero origine ad un fenomeno di "denudamento tettonico", noto come "Serie ridotta", reso evidente dalla diretta sovrapposizione delle Unità Liguri e Subliguri alle evaporiti triassiche o addirittura al basamento paleozoico (Decandia et al., 1993). Durante le fasi più avanzate del processo distensivo, con l'approfondimento dei livelli di scollamento si realizzarono nuove famiglie e sistemi di faglie dirette caratterizzati da valori angolari medi ed alti. Ciò determinò un'ulteriore scompaginazione dei rapporti fra le varie unità tettoniche e la formazione di una serie di alti morfologico - strutturali separati da depressioni, le quali anda-

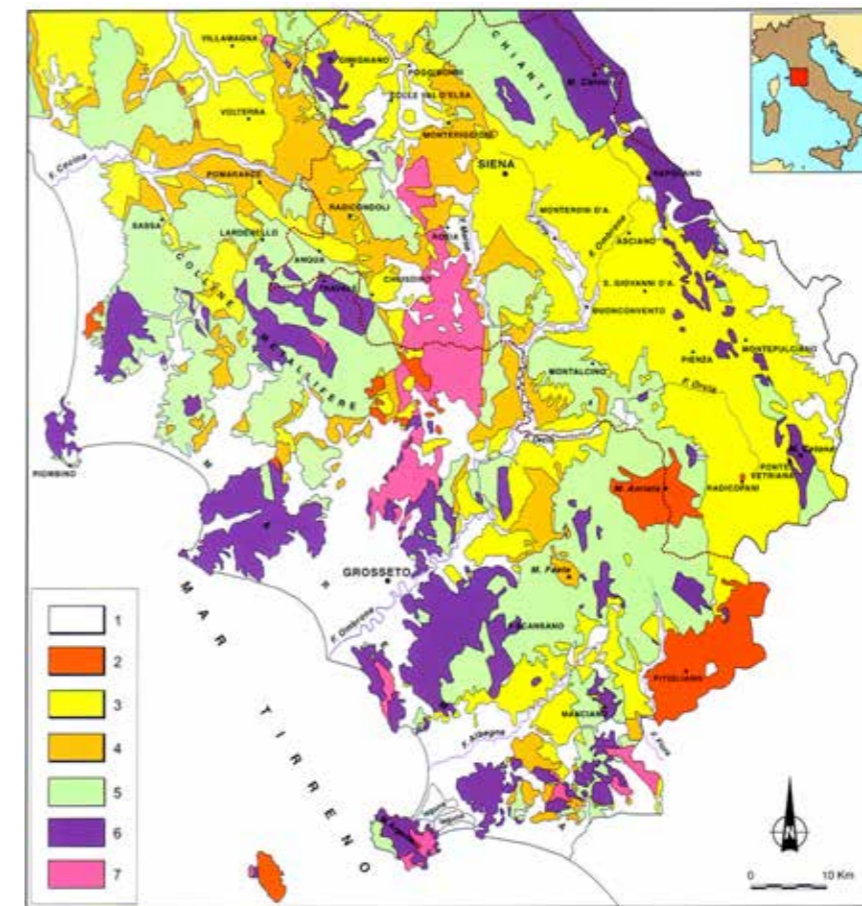


Fig. 3. Schema geologico della Toscana meridionale, con indicazione delle principali unità affioranti. Il tratteggio indica il limite della Provincia di Siena. 1) Formazioni del Pleistocene-Olocene; 2) Complessi magmatici; 3) Formazioni Plioceniche; 4) Formazioni Mioceniche; 5) Unità Liguri e Subliguri (o Austroalpine); 6) Unità Toscane non metamorfiche; 7) Unità Toscane metamorfiche e marmi della Montagnola Senese (Lazzarotto & Pascucci, 1998).

rono progressivamente riempiendosi di depositi sedimentari prima di ambiente d'acqua dolce, poi salmastro ed infine marino.

L'attività delle deformazioni distensive si è espressa in modo marcatamente diacrono con sviluppo di bacini distensivi prevalentemente neogenici nei settori orogenici interni (corrispondenti alla Toscana meridionale) e contemporanea migrazione verso i quadranti nord-orientali dei fronti e delle deformazioni compressive attraverso l'individuazione delle Unità Umbro - Marchigiano - Romagnole (Elter *et al.*, 1975). Le deformazioni distensive sono tuttora attive lungo lo spartiacque Tirreno - Adriatico, come testimoniato dall'intensa sismicità con soluzioni dei meccanismi focali di tipo distensivo che ha avuto le sue ultime manifestazioni nei terremoti dell'Aquila (2009), di Amatrice e di Norcia (2016, 2017 e tuttora in corso di attività); quelle compressive, invece, sono attive sul versante romagnolo - marchigiano esterno e nell'*offshore* adriatico, come evidenziato dalla sismicità con soluzioni dei meccanismi focali di tipo compressivo in occasione del terremoto dell'Emilia (2012).

L'instaurarsi di un regime tettonico distensivo, tipico del margine tirrenico dell'Appennino settentrionale e che ha avuto in Toscana meridionale le maggiori evidenze, a partire dal Miocene è stato accompagnato da un'intensa e varia attività magmatica che si è progressivamente estesa verso i quadranti orientali e nord-orientali, con effetti protratti fino ad epoca recente. Studi ormai divenuti "classici" nella letteratura specifica (ad esempio quello di Marinelli, 1985) attribuiscono l'attività magmatica del settore tirrenico settentrionale a due distinte province: quella toscana e quella romana. Pur essendo in corso di revisione, si rileva che di questa suddivisione permangono ancora validi i suoi elementi fondanti.

Le manifestazioni magmatiche appartenenti alla Provincia toscana sono distribuite in settori che vanno dall'Elba occidentale fino a Radicofani, attraverso l'Elba orientale, Orciatico, Montecatini Val di Cecina, Campiglia Marittima, Gavorrano, Roccastrada ed il Monte Amiata. Anche se il magmatismo più recente (quello del Monte

Amiata) non è più attivo, l'elevato flusso di calore riconosciuto in tutta la Toscana sud-occidentale ne rappresenta la "memoria geologica"; ed è proprio a questo flusso che sono riconducibili le manifestazioni geotermiche delle Colline Metallifere e di altre zone sparse nella Toscana meridionale compresa quella del Monte Amiata.

Sistema idrotermale e fluidi geotermici

Un sistema idrotermale è tipicamente caratterizzato dalla compresenza dei seguenti elementi fondamentali: 1) un'importante sorgente di energia termica, di solito rappresentata da intrusioni magmatiche in raffreddamento a profondità di alcuni chilometri nella crosta terrestre; 2) un insieme di formazioni, sovrastante la sorgente termica e permeabile al flusso di fluidi, che costituisce il cosiddetto serbatoio geotermico; 3) un complesso di formazioni impermeabili che sovrasta e sigilla il serbatoio; 4) un meccanismo di ricarica del serbatoio mediante l'infiltrazione di acqua meteorica dall'alto, oppure lateralmente da altri serbatoi adiacenti.

Il geofluido è il mezzo che, una volta convogliato dal serbatoio geologico alla centrale elettrica, trasforma la propria energia termica prima in lavoro meccanico poi in energia elettrica mediante turbine ed alternatori. Esso è composto quasi interamente da acqua (H_2O) nello stato liquido o in quello di vapore. La componente liquida è una soluzione contenente in genere silice (SiO_2), sodio (Na), potassio (K), calcio (Ca), cloro (Cl) e acido carbonico (H_2CO_3), spesso in forma ionica (si ricorda, in proposito, come l'acido borico caratterizzi l'area di Larderello). Da notare che la progressiva vaporizzazione del geofluido implica la concentrazione della soluzione liquida rimanente (salamoia). Inoltre, l'acqua è sempre accompagnata da gas detti "non condensabili" in quanto rimangono in tale forma dal serbatoio sino alla centrale elettrica; tra i più comuni si segnalano il monossido ed il biossido di carbonio (CO e CO_2), il metano (CH_4) ed il solfuro di idrogeno (H_2S). La presenza di gas

nel geofluido peggiora l'efficienza della conversione da energia termica ad energia elettrica e può causare seri problemi tecnici ed ambientali.

Il titolo di una miscela acquosa bifase (liquido-vapore) è costituito dal rapporto tra la massa del vapore e quella totale della miscela; pertanto, il titolo di fluidi formati da solo liquido o solo vapore sarà rispettivamente 0 e 100%. Il contenuto energetico del geofluido è definito dalla sua entalpia specifica (relativa cioè alla sua unità di massa), la quale dipende dal titolo della miscela bifase; a parità di temperatura e pressione, infatti, l'entalpia del vapore è sempre molto maggiore di quella del liquido. Alla temperatura di 99,6 °C ed alla pressione di 1 bar l'entalpia specifica dell'acqua liquida e del vapore d'acqua valgono rispettivamente 417,5 e 2.675,4 kJ/kg. La massima entalpia specifica, pari a 2.804,2 kJ/kg, è posseduta dal vapore d'acqua saturo che si trovi alla temperatura di 235 °C ed alla pressione di 30,6 bar (circa 30 volte la pressione atmosferica). Da evidenziare che i termini "alta", "media" e "bassa" entalpia dovrebbero essere sempre riferiti all'entalpia specifica del geofluido e non alla sua temperatura perché quest'ultima, da sola, è del tutto inadatta a definire il contenuto energetico della miscela bifase. Tenendo presente che a differenza dei processi termodinamici ideali i cicli reali sono sempre associati a fenomeni irreversibili e dissipativi, accanto all'entalpia specifica deve essere considerata l'entropia specifica del geofluido [espressa in kJ/(kg·K)]. Combinandole opportunamente si perviene all'esergia specifica, la quale definisce in modo appropriato la capacità del fluido di convertire il proprio contenuto energetico in potenza elettrica; in particolare, l'esergia specifica esprime correttamente la qualità del geofluido, permettendo il confronto delle risorse estratte da differenti sistemi geotermici (Lee, 2001; Di Pippo, 2015).

I campi geotermici

Il vasto settore grossomodo compreso tra i fiumi Arno e Tevere è caratterizzato da un considerevo-

le flusso termico emesso alla superficie (0,15-0,2 Wm^{-2}); localmente, la vigorosa circolazione idrotermale determina valori del flusso termico ancora più elevati, sino a raggiungere $1Wm^{-2}$ (Cataldi *et al.*, 1995; Bellani & Della Vedova, 2004). Da tempo è accettata l'idea che la causa di questa significativa anomalia termica sia il raffreddamento progressivo di intrusioni magmatiche plio-quaternarie ubicate nella crosta superiore; fra l'altro, importanti evidenze di processi magmatici recenti sono fornite dagli apparati vulcanici toscani (tra cui il Monte Amiata) e laziali.

Dal pionieristico lavoro di Marinelli (1969) ad oggi, sono stati pubblicati numerosi contributi sulla geologia delle zone geotermiche toscane da parte di ricercatori di varie università e di enti di ricerca e società commerciali. Tali contributi hanno permesso di chiarire, almeno in prima approssimazione, l'assetto strutturale delle diverse aree mediante analisi stratigrafiche e geologico-strutturali, nonché modelli idrogeologici e rilievi geofisici (gravimetrici, sismici, elettromagnetici e termici). Per evitare una lunga lista di citazioni, si indicano i lavori più recenti (Arias *et al.*, 2010; Barelli *et al.*, 2010; Fulignati *et al.*, 2014; Romagnoli *et al.*, 2010) da cui agevolmente ricostruire lo sviluppo delle conoscenze sull'argomento.

L'AREA GEOTERMICA SETTENTRIONALE

Tale settore dei comuni di Castelnuovo Val di Cecina, Monterotondo Marittimo, Monteverdi Marittimo, Montieri, Pomarance e Radicondoli comprende i campi geotermici di Larderello-Lago e Travale-Radicondoli (vedi Fig. 1).

Nel campo di Larderello-Lago è stata esplorata un'area di circa 250 km²; i 200 pozzi producono vapore surriscaldato a una pressione compresa tra 2 e 18 bar e una temperatura compresa tra 150 °C e 270 °C. Il contenuto di gas non condensabili varia dall'1 al 15% in peso. La potenza installata è di 580 MW, con 23 centrali elettriche in funzione. La sostenibilità delle risorse, in una zona sfruttata fin dall'inizio del XX° secolo, è garantita da due principali strategie per la ge-

stione del sistema: la re-iniezione dei fluidi e la perforazione profonda. Dalla fine degli anni '70 del secolo scorso la re-iniezione del condensato di vapore nella parte superficiale del serbatoio carbonatico ha avuto un effetto positivo, soprattutto nella zona più sfruttata (Valle Secolo), permettendo di aumentare la pressione nel serbatoio e la produzione di vapore. Per quanto riguarda invece il programma di esplorazione profonda, si rileva che esso ha mostrato la presenza di strati permeabili nel basamento metamorfico laddove (a 3.000 - 4.000 m di profondità) la temperatura e la pressione del geofluido raggiungono rispettivamente 350 °C e 70 bar.

Nel campo di Travale-Radicondoli l'area esplorata copre circa 50 km²; 29 pozzi producono vapore surriscaldato ad una pressione variabile da 8 a 20 bar e una temperatura di 190-250 °C. Il contenuto di gas non condensabili è compreso tra il 4 e l'8% in peso. La potenza installata è di 220 MW con 8 centrali in funzione. Anche in questa zona, l'esplorazione profonda ha individuato livelli permeabili all'interno del basamento metamorfico; in alcuni pozzi sono stati inoltre riconosciuti livelli produttivi nel granito sottostante il basamento metamorfico.

L'attività di perforazione profonda ha suggerito che i due campi apparentemente distinti di Larderello-Lago e Travale-Radicondoli possano rappresentare l'affioramento di un unico e ampio sistema geotermico; alla profondità di 3.000 - 4.000 m questo presenterebbe un'estensione complessiva di circa 400 km².

L'area geotermica settentrionale è caratterizzata da una copertura impermeabile di spessore variabile (200-1000 m), costituita da formazioni autoctone neogeniche ed alloctone (Unità liguri). Il sottostante serbatoio geotermico include un livello più superficiale (unità carbonatiche fratturate) ed uno profondo localizzato nel basamento metamorfico. La base del sistema geotermico è convenzionalmente definita dalla posizione del cosiddetto "orizzonte K", un livello particolarmente riflettente alle onde sismiche che potrebbe corrispondere con la transizione tra il comporta-

mento fragile e duttile delle rocce del basamento crostale. Tale transizione, forse coincidente con l'isoterma di 400 °C, implica la scomparsa delle fratture (e quindi una scarsa permeabilità) al di sotto dell'orizzonte suddetto, la cui profondità varia da 8-10 km nel settore orientale, a 3-4 km in quello occidentale. La natura e le caratteristiche dell'orizzonte K e di altri livelli crostali riflettenti è oggetto di studio per verificare se possono suggerire l'individuazione di settori della crosta particolarmente ricchi di geofluidi in pressione, come è accaduto per l'aureola di contatto tra il plutone pliocenico e le rocce metamorfiche incassanti (Ebigbo et al., 2016).

Per quanto riguarda l'aspetto idrogeologico, sembra che la maggior parte della ricarica naturale del sistema provenga dall'evaporazione nelle falde acquifere adiacenti il sistema stesso; ciò, sommato all'effetto della re-iniezione di parte del geofluido estratto, dovrebbe garantire l'attuale livello di produzione per almeno 100 anni (Romagnoli et al., 2010).

L'AREA GEOTERMICA MERIDIONALE

Il settore comprende il campo geotermico di Piancastagnaio-Bagnore, contenuto nei comuni di Piancastagnaio e Santa Fiora. Il campo fu individuato tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60, con pozzi che producevano vapore proveniente dal serbatoio carbonatico superficiale. Alla fine degli anni '70 fu avviato un programma di esplorazione profonda che rivelò la presenza di livelli fratturati e permeabili entro il basamento metamorfico sottostante il serbatoio superficiale, a profondità comprese tra 2.500 e 4.000 m. Il geofluido contenuto in questo serbatoio profondo è prevalentemente liquido, con temperatura di 300-350 °C e pressione di circa 200 bar alla profondità di 3.000 m. A causa della riduzione della pressione e della conseguente ebollizione durante la risalita, il fluido estratto in superficie è una miscela bifase con una pressione residua di circa 20 bar. Vapore e liquido vengono separati e convogliati rispettivamente

alla centrale elettrica ed ai pozzi di re-iniezione. Il contenuto di gas non condensabile nel vapore varia dal 6 all'8% in peso. La potenza installata è di 120 MW, con 6 centrali elettriche in funzione.

I modelli idrogeologici, elaborati in base alle evidenze disponibili, indicano che i serbatoi geotermici superficiale e profondo hanno scarse interazioni con l'acquifero freatico del Monte Amiata, il quale è impostato nelle rocce vulcaniche permeabili ed è separato dal sistema geotermico dalle Unità liguri impermeabili (Barelli et al., 2010). In altre parole, l'estrazione del geofluido non sembra influenzare la qualità e la quantità dell'acqua potabile prodotta dall'acquifero amiatino.

La qualità delle risorse e gli impianti di produzione

Dal punto di vista tecnico, la qualità dei geofluidi ottenuti dai sistemi della Toscana meridionale è generalmente ottima, come indicato dal confronto con i prodotti degli altri campi geotermici del mondo in termini di esergia specifica (Lee, 2001). In particolare, il vapore estratto nei campi di Larderello-Lago e Travale-Radicondoli (Foto 1) ha il contenuto energetico più elevato, superiore a quello della risorsa prodotta dal famoso giacimento dei Geysers nella California settentrionale (Stati Uniti).

Considerazioni termodinamiche suggeriscono che il vapore contenuto nel serbatoio geotermico sia nello stato di massima entalpia specifica.



Foto 1. Potente e repentina condensazione del vapore in uscita dal pozzo dimostrativo di Valle Secolo a Larderello nel Comune di Pomarance (febbraio 2017).

Tabella 1 - Portata, temperatura, pressione e contenuto di gas non condensabili del vapore usato per la produzione di energia elettrica in quattro centrali dei campi geotermici di Larderello-Lago e Travale-Radicondoli (Di Pippo, 2012).

Centrale elettrica	Portata del vapore	Temperatura del vapore	Pressione del vapore	Gas non condensabili
	(kg/s)	(°C)	(bar)	(% in peso)
Lago	22	127	2,5	1,7
Molinetto	36	190	6,5	4
Gabbro	40	162	6,5	12
Travale	69	195	14	5

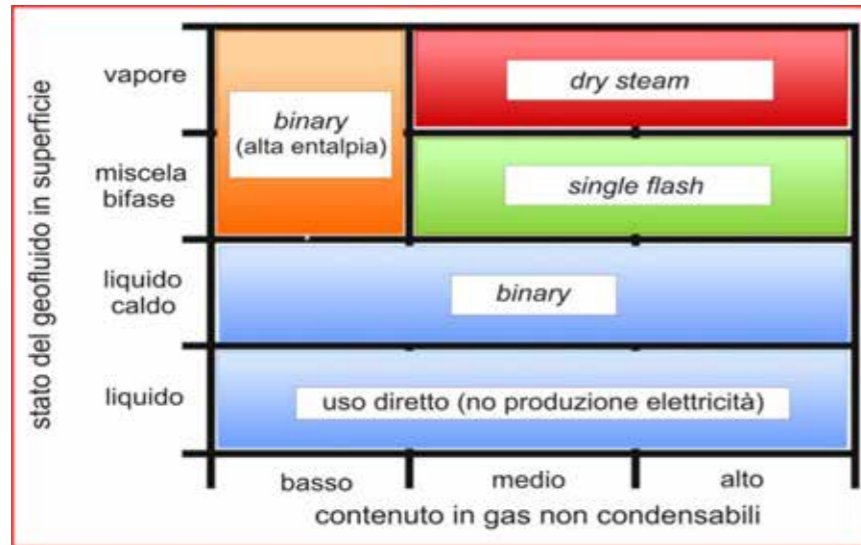


Fig. 4. Tipologia degli impianti geotermoelettrici in relazione alle caratteristiche del geofluido estratto.

Ovviamente il processo di risalita del fluido, dal serbatoio alla superficie, comporta una certa dissipazione energetica che si riflette in un calo della pressione e della temperatura. Il valore di tali parametri resta comunque elevato, come indicato dalla Tabella 1.

La configurazione degli impianti di produzione di elettricità dipende strettamente dal tipo di risorsa disponibile (Fig. 4). Se il geofluido è costituito da vapore saturo o, più raramente, surriscaldato l'impianto è concettualmente semplice (*dry steam plant*). Il vapore viene convogliato, tramite apposite condutture (*pipeline*), dai pozzi di produzione alle turbine, la cui rotazione è trasmessa ai generatori di corrente elettrica alternata. Quest'ultima è portata ad una tensione adeguata attraverso le cabine di trasformazione e poi immessa nella rete elettrica. Il vapore in uscita dalle turbine viene condensato in uno scambiatore di calore e, dopo essere raffreddato ulteriormente dall'aria nelle apposite torri refrigeranti, è inviato ai pozzi predisposti per la re-immissione nel sottosuolo.

Quando il geofluido che giunge in superficie è una miscela bifase, è necessario separare con appositi dispositivi il liquido dal vapore prima di inviare quest'ultimo alle turbine (*single flash plant*). Se il liquido separato mantiene un'entalpia elevata, può subire un'ulteriore evaporazione per aumentare il flusso di vapore in turbina

(*double flash*); in alcuni casi si può operare anche una terza fase di evaporazione (*triple flash*). Infine, se il geofluido possiede una bassa entalpia è più conveniente trasferire il calore ad un fluido di lavoro volatile, il cui vapore alimenterà le turbine (*binary plant*). Tra i possibili fluidi di lavoro si ricordano alcuni cloro-fluoro-carburi (R-12 e R-114), idrocarburi alcani (propano, butano e pentano) e l'ammoniaca (NH₃), sia pura che in soluzione acquosa.

Gli impianti geotermici di Larderello-Lago e Travale-Radicondoli sono di tipo *dry steam* perchè il geofluido è in fase di vapore, mentre quelli di Piancastagnaio-Bagnore adottano le tecnologie *single flash* e *binary* adatte per le miscele bifase.

L'industria geotermoelettrica toscana si è evoluta in modo considerevole nell'arco di oltre un secolo; spesso le innovazioni apportate sono state poi applicate nei principali sistemi geotermici nel mondo. È importante ricordare che, dalla fine del secolo scorso, è in atto un processo di dismissione degli impianti obsoleti e di sostituzione con centrali più moderne ed efficienti. Tale processo è stato motivato dalla necessità di sfruttare in modo ottimale le risorse estratte mediante le perforazioni profonde (Di Pippo, 2012, 2015). Le nuove unità produttive sono di tipo "modulare", nel senso che sono progettate con schemi semplici e facilmente riproducibili; l'apparato

delle turbine, in precedenza progettato *ad hoc* per ogni singola centrale, è ottenuto ad esempio dalla combinazione di elementi standardizzati di potenza predefinita (10, 20, 40 e 60 MW). Le stesse considerazioni valgono per altri elementi dell'impianto di produzione, come le pompe di circolazione del geofluido, i condensatori del vapore esausto, gli estrattori ed i compressori dei gas non condensabili e le torri di raffreddamento del condensato. Queste ultime, in particolare, sono manufatti cilindrici relativamente bassi e perfettamente inseriti nel corpo della centrale; ciò le rende molto meno invasive rispetto alle torri precedenti (alti edifici in cemento grigio e forma iperboloidale, visibili da decine di chilometri di distanza).

L'insieme delle innovazioni tecnologiche, apportate agli impianti di produzione, ha notevolmente aumentato l'efficienza della conversione dell'energia del geofluido in potenza elettrica; attualmente, gli impianti della Toscana meridionale presentano rendimenti termodinamici pari o addirittura superiori a quelli ottenuti nei sistemi geotermici islandesi, neozelandesi e statunitensi (Di Pippo, 2015). Accanto al miglioramento dell'efficienza energetica, i nuovi impianti presentano sostanziali novità per il contenimento delle emissioni di sostanze nocive o indesiderate. Ciò riguarda soprattutto il trattamento dei gas non condensabili: una volta estratti dal vapore, essi vengono inviati al cosiddetto impianto AMIS dove avviene prima l'abbattimento delle eventuali tracce di mercurio, poi l'ossidazione pressoché completa del solfuro di idrogeno a biossido di zolfo (SO₂) ed infine la riduzione di quest'ultimo a zolfo (materia prima per l'industria dell'acido solforico).

Un'ultima considerazione riguarda le attività di immissione nel sottosuolo dei liquidi di scarto del processo di produzione. Questi ultimi, che come detto in precedenza derivano dalla separazione delle miscele bifase e dalla condensazione del vapore esausto in uscita dalle turbine, sono delle salamoie concentrate per cui la loro liberazione in superficie è sconsigliata o proibita,

mentre la loro iniezione nel sottosuolo mitiga l'impatto ambientale dell'industria geotermica. Inoltre, la re-iniezione del geofluido residuo in pozzi profondi che intercettano il serbatoio geotermico contribuisce in modo significativo alla ricarica dello stesso; se il volume del liquido iniettato è poi cospicuo, la sua pressione contribuisce a sostenere le rocce sovrastanti contrastando efficacemente possibili fenomeni di subsidenza del suolo. In proposito si ricorda che quando la re-iniezione non era ancora praticata la subsidenza ha provocato gravi problemi di stabilità nei manufatti industriali e civili di campi geotermici come quello di Wairakei in Nuova Zelanda (Di Pippo, 2012).

Nell'area di Larderello (Valle Secolo) la re-iniezione dei liquidi di scarto, praticata dal 1974 per contrastare la sensibile diminuzione della portata del geofluido estratto, in gran parte avviene alla sommità del serbatoio carbonatico superficiale (Axelsson, 2012). Sin dall'inizio tale attività è stata molto efficace, permettendo il rapido ripristino della portata e della pressione del geofluido estratto; questo è il motivo per cui essa è divenuta di uso comune in tutti i campi geotermici toscani. I dati disponibili indicano che nei sistemi di Larderello e Travale la quantità di liquido oggi iniettato supera le 1.500 tonnellate/ora, mentre la produzione di vapore raggiunge le 4.700 tonnellate/ora (Romagnoli *et al.*, 2010).

L'impatto ambientale

Se gran parte dei liquidi di scarto sono re-immessi nel sottosuolo, i fanghi sono smaltiti in apposite discariche. Di conseguenza, l'impatto principale è rappresentato dall'emissione in atmosfera di sostanze inquinanti, talora in concentrazioni superiori a quelle delle emissioni naturali. Le conseguenze ambientali dipendono dal tipo di impianto, dalle caratteristiche geologiche, morfologiche ed idrologiche dell'area e dalle locali condizioni meteo-climatiche. Le emissioni, che av-

vengono soprattutto dalle torri di raffreddamento, sono costituite da anidride carbonica (prevalente), solfuro di idrogeno e metano; in misura minore fuoriescono anche azoto, idrogeno, ammoniaca, acido borico, radon, gas rari ed altri elementi in tracce quali mercurio, arsenico ed antimonio.

Oltre all'emissione di inquinanti, lo sfruttamento geotermico può determinare problemi di subsidenza del terreno, interferire con la sismicità naturale, produrre un inquinamento acustico per i lavoratori degli impianti ed un danno al paesaggio; in definitiva, la geotermia presenta sia benefici che rischi, come accade per tutte le attività industriali. Un'ampia discussione del bilancio tra questi aspetti contrastanti è fornito da Di Pippo (2012), con esempi tratti da varie zone del mondo.

Per quanto riguarda le attività connesse con le aree geotermiche toscane, preme in particolare considerare la loro possibile influenza sul grado di inquinamento dell'aria e dell'acqua, nonché sulla sismicità.

INQUINAMENTO DELL'ARIA E DELL'ACQUA

Qualche anno fa è stato pubblicato, con il contributo della Regione Toscana, un ampio studio mirato alla valutazione dell'impatto che l'attività geotermica ha sull'ambiente e sulla salute della popolazione coinvolta (Minichilli *et al.*, 2012); una parte cospicua dei quasi duecento lavori citati in tale studio è costituita da analisi ambientali e sanitarie relative a settori specifici delle aree geotermiche toscane.

Dal 1997 la qualità dell'aria e dell'acqua nei comprensori geotermici è costantemente monitorata dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPAT). Nel periodo 1997-2008 le concentrazioni medie di acido solfidrico nell'aria risultano pari a 19,1 (Larderello-Lago), 6,0 (Travale-Radicondoli), 16,5 (Amiata senese) e 2,8 (Amiata grossetana) mg/m³ (Minichilli *et al.*, 2012). Tali valori sono inferiori alla soglia di attenzione, indicata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), che è di 20 mg/m³. Sempre nel medesimo periodo e nelle stesse aree,

le concentrazioni medie del vapore di mercurio sono risultate pari a 0,0006, 0,0003, 0,0085 e 0,006 mg/m³ (Minichilli *et al.*, 2012) e, quindi, ancora lontani dalla soglia di attenzione proposta dalla WHO (1 mg/m³). Un inconveniente è invece rappresentato dal frequente superamento della soglia olfattiva per il solfuro di idrogeno (7 mg/m³), spesso favorito da condizioni meteorologiche avverse. Relativamente al gas radon, le analisi mettono in evidenza una cospicua differenza tra le due aree geotermiche, con una concentrazione 3-4 volte maggiore nell'area meridionale rispetto a quella settentrionale. Più che dall'attività geotermica, comunque, ciò dipende dal fatto che l'area amiatina è caratterizzata da rocce vulcaniche ad elevato contenuto di radionuclidi naturali (Minichilli *et al.*, 2012). Per quanto concerne le acque, le indagini hanno messo in evidenza la buona qualità di quelle potabili nella Toscana meridionale, che diviene ottima per le sorgenti dell'acquifero amiatino essendo prive di anomalie riguardanti il mercurio, l'antimonio, l'ammoniaca ed il boro. Nell'area geotermica settentrionale si segnalano localmente anomale concentrazioni di boro e, in misura più ridotta, di arsenico. Il problema dell'arsenico è ben più rilevante nell'area geotermica meridionale, ove in alcune sorgenti sono state rilevate concentrazioni superiori a 10 µg/L. Tuttavia, la presenza di arsenico nell'acquifero amiatino può essere ragionevolmente attribuita sia all'alterazione delle rocce vulcaniche che alle precedenti attività estrattive (Minichilli *et al.*, 2012).

L'analisi epidemiologica ha riguardato la popolazione delle due aree geotermiche che assomma a circa 43.000 abitanti. Sono stati considerati i dati demografici e sanitari relativi alla natalità, alla mortalità, ai ricoveri ospedalieri ed alle malformazioni congenite per il periodo 2000-2006. Mediante opportuni metodi statistici i suddetti parametri sono stati confrontati con analoghi indicatori ottenuti per i comuni della Toscana meridionale non compresi nelle aree geotermiche. I risultati ottenuti indicano che lo stato di salute della popolazione nelle aree geo-

termiche non differisce in modo significativo da quello relativo ai comprensori non geotermici (Minichilli *et al.*, 2012).

Quanto sopra descritto suggerisce che nella Toscana meridionale il problema delle emissioni inquinanti legate all'attività geotermica possa essere considerato sotto controllo. Ciò grazie al concorso di più fattori: una stringente normativa, il controllo da parte delle Istituzioni (in particolare la Regione Toscana ed i Comuni), la maggiore sensibilità ambientale delle popolazioni coinvolte e le innovazioni tecnologiche introdotte negli impianti di produzione.

SISMICITÀ INDOTTA

DALLE ATTIVITÀ DI RE-INIEZIONE

Dalla seconda metà del secolo scorso la comunità scientifica ha avviato un dibattito sulla possibilità che l'immissione di fluidi nel sottosuolo, pratica comune nell'industria geotermica, nello sfruttamento degli idrocarburi e nello smaltimento delle acque reflue urbane ed industriali, influenzi i processi sismogenetici. Una discussione completa sulla sismicità indotta è stata effettuata da Mc Garr (2014) a cui si rimanda. In questa sede merita evidenziare che essa è riuscita a catturare l'attenzione dell'opinione pubblica mondiale a causa di quanto avvenuto in alcuni giacimenti di idrocarburi e sistemi geotermici non convenzionali (rispettivamente *Shale Oil and Gas* ed *Enhanced Geothermal Systems*) dove le attività prevedevano l'immissione nella crosta di grandi volumi di soluzioni acquose a forte pressione: nel caso dei giacimenti *shale* lo scopo era quello di fratturare le rocce (*hydrofracturing* o *fracking*) e separare il petrolio e il gas naturale dalle formazioni per portarlo in superficie; nel caso dei sistemi *enhanced* quello di generare una permeabilità artificiale in rocce profonde e calde ma secche.

Nell'America del Nord la grande espansione industriale legata ai giacimenti *shale* è stata accompagnata da rilevanti problemi ambientali e dalla comparsa di una sismicità inusuale, sia per la frequenza che per la magnitudo degli eventi

(soprattutto nella parte orientale e centrale degli Stati Uniti).

Riguardo ai sistemi geotermici *enhanced*, presenti soprattutto nell'Europa continentale, vale la pena ricordare la sorte del *Deep Heat Mining project*. Nel 1996 la società *Geopower Basel* avviò questo progetto di sfruttamento del calore immagazzinato nella crosta della Fossa renana dove si trova Basilea, un attivo centro industriale e finanziario della Svizzera con circa 700.000 abitanti. Nel lontano 1356 la città era stata colpita dal più forte terremoto mai registrato nell'Europa continentale; la magnitudo stimata (M), infatti, era stata pari a 6,7. Nell'ottobre 2006 il pozzo di iniezione dell'acqua in pressione raggiunse la profondità di circa 5.000 m, mentre in superficie era stata installata una rete sismometrica di controllo. A dispetto di alcuni contrasti tra la società e le autorità locali da un lato, il Servizio sismologico svizzero dall'altro, le operazioni di iniezione cominciarono il successivo 2 dicembre. Come previsto, la fratturazione idraulica profonda produsse migliaia di micro - terremoti, ma di questi solo pochi furono percepiti in superficie. Il 7 dicembre, dopo qualche ora dalla cessazione dell'iniezione, si verificò un terremoto (M = 3,4) che fu sentito da gran parte della popolazione. Nonostante che i danni fossero stati minimi (fessure nell'intonaco delle abitazioni), l'opinione pubblica fu allarmata e le autorità decisero di sospendere le operazioni. Infine, dopo mesi di dibattito il progetto fu definitivamente chiuso, con la perdita totale degli investimenti. Il caso in esame dovrebbe far riflettere non solo sui problemi posti dalla sismicità indotta, ma anche sulle differenze tra sistemi geotermici idrotermali e non convenzionali.

La possibilità di terremoti indotti è stata presa in considerazione anche per la Toscana meridionale (Braun *et al.*, 2016). A titolo di esempio, si ricorda che il 1 aprile 2000 si è verificato presso Piancastagnaio un terremoto (magnitudo circa 4, profondità dell'ipocentro circa 2 km) i cui danni hanno riguardato solo alcune abitazioni nelle campagne circostanti; dato che l'epicentro della scossa cadeva nel campo geotermico di Piancastagnaio, si è però subito pensato ad un

collegamento con l'attività geotermica. Da rilevare, tuttavia, che la zona del Monte Amiata è caratterizzata da una sismicità del tutto naturale visto che le scosse principali precedono l'attività antropica. Questo convincimento deriva dal fatto che il terremoto più importante dell'area, con $M = 5,4$ ed epicentro nella valle del F. Paglia, è avvenuto il 10 settembre 1919 e quindi molto prima dell'avvio dello sfruttamento geotermico (tra il 1950 e il 1960).

E' molto difficile distinguere in modo convincente il contributo dei processi naturali da quello antropico, soprattutto se si considerano i soli terremoti principali trascurando le altre informazioni disponibili; per superare tale difficoltà, è opportuno stabilire in anticipo una strategia adeguata. La prima operazione è quella di installare una rete di stazioni sismometriche in grado di registrare anche i micro - terremoti ($M \leq 1$); ciò amplia di molto la base dei dati da adoperare nell'analisi successiva. Considerando la quantità e la profondità delle perforazioni nei campi geotermici, è fra l'altro possibile disporre di buoni modelli sismo-stratigrafici che permettono di determinare in modo affidabile l'epicentro, l'ipocentro ed il meccanismo focale degli eventi sismici locali. Nelle zone geotermiche toscane, comunque, operano da anni reti sismografiche permanenti o temporanee (Albarello *et al.*, 2005; Piccinini *et al.*, 2014; Braun *et al.*, 2016). Il passo successivo è l'elaborazione di modelli fisici realistici degli effetti causati dall'immissione di fluidi nel sottosuolo. La teoria dei mezzi poro-elastici, applicabile ai sistemi roccia/fluido, prevede una perturbazione della pressione di poro (*pore pressure diffusion*) che dal punto di iniezione migra progressivamente entro la crosta (Yang *et al.*, 2015). Si genera così una sorta di "fronte di deformazione" che, investendo volumi sempre più grandi di roccia, può sollecitare le fratture esistenti fino a causarne lo slittamento repentino determinando un insieme di eventi sismici. Le modalità di propagazione della pressione dei fluidi dipende dalle caratteristiche del sistema poro-elastico, descritte dalla cosiddetta "diffusività idraulica"; tale gran-

dezza, infatti, è legata sia alle proprietà fisiche della roccia (porosità, permeabilità e comprimibilità) che del fluido (viscosità e comprimibilità). In un determinato esperimento di iniezione il confronto tra il modello teorico di *pore pressure diffusion* e l'andamento spaziale e temporale della sismicità reale (registrata dalla rete sismometrica) permette di decidere se lo sciame sismico osservato è compatibile o meno con l'immissione dei fluidi nel sottosuolo (Shapiro & Dinske, 2009). Come esempio di applicazione di questa metodologia si segnala l'analisi della sismicità indotta nel giacimento petrolifero della Val d'Agri in Basilicata (Stabile *et al.*, 2014).

Per quanto riguarda la dimensione dei terremoti indotti, le ricerche teoriche ed i dati sismologici indicano un rapporto diretto tra il volume totale immesso nel sottosuolo e la magnitudo massima delle scosse (Mc Garr, 2014). Se esiste una frattura sufficientemente ampia da poter immagazzinare completamente il fluido iniettato è logico pensare che ad un maggiore volume immesso nel sottosuolo corrisponda una più grande area occupata della superficie di faglia e, quindi, un più importante terremoto indotto. Negli altri casi è abbastanza verosimile che l'iniezione possa interessare più faglie distinte, generando eventualmente uno sciame di scosse minori. Quest'ultima considerazione mette in evidenza come sia importante la conoscenza dell'assetto strutturale della crosta, oltre che della natura e della disposizione delle faglie attive in rapporto all'ubicazione dei pozzi di d'iniezione (Stabile *et al.*, 2014).

Per meglio valutare le implicazioni della relazione sopra descritta è utile ricordare quanto sostenuto da Mc Garr (2014): un terremoto che può causare panico ma solo danni modesti ($M = 4$) è compatibile con l'iniezione di alcune decine di migliaia di metri cubi di liquido; uno invece che è capace di provocare danni rilevanti ($M = 5$), specie se l'ipocentro è superficiale, richiede un volume iniettato di circa un milione di metri cubi. Quest'ultimo valore appare piuttosto elevato, se rapportato con i volumi iniettati per singolo pozzo nei campi geotermici; ad esempio, l'esperimento



Foto 2. Densa nebbia prodotta dalla condensazione del vapore geotermico nel Parco naturale delle Biancane a Monterotondo Marittimo (febbraio 2017).

di Basilea sopra descritto, durato 5 giorni e mezzo, ha comportato l'immissione di soli 10.800 m³ d'acqua. Molto diversa è la situazione delle attività di smaltimento di inquinanti perché in questo caso i grandi volumi iniettati possono determinare terremoti piuttosto forti; quello di Prague (Oklahoma, USA), che nel novembre 2011 ha raggiunto una magnitudo di 5,7, ne è un esempio (Mc Garr, 2014).

Relativamente alla geotermia è importante notare la differenza sostanziale che esiste tra sistemi convenzionali e non convenzionali. Per quest'ultimi, la prima fase della coltivazione è costituita esclusivamente dall'iniezione del fluido perché il serbatoio geotermico deve essere generato proprio dalla fratturazione idraulica; nei sistemi convenzionali, invece, la re-immissione segue l'estrazione del geofluido naturale avendo solo lo scopo di compensare quest'ultima. Ciò suggerisce che i sistemi idrotermali siano intrinsecamente più sicuri dei sistemi *enhanced*.

In definitiva, per i campi geotermici toscani il rischio della sismicità indotta può essere tenuto sotto controllo, sia con la raccolta e l'analisi dei dati sismologici, sia operando con l'accortezza che l'attività di re-iniezione venga ripartita su numerosi pozzi ben distanziati, in modo che nessuna delle eventuali faglie attive risulti permeata da rilevanti quantità di fluido.

Considerazioni conclusive

I sistemi idrotermali della Toscana meridionale presentano un grande interesse scientifico, tecnologico ed economico. Lo sfruttamento delle risorse geotermiche può avere notevoli prospettive, sia a livello regionale che nazionale, purché avvenga entro un quadro di costante controllo delle attività industriali; ciò richiede la convergenza di fattori quali l'impegno delle Istituzioni, la sensibilità delle popolazioni coinvolte e l'innovazione tecnologica proposta dagli operatori commerciali.

Una considerazione deve essere riservata anche al valore paesaggistico e culturale delle zone geotermiche. Ai ben noti stabilimenti termali si affiancano, infatti, numerosi siti ed itinerari di grande interesse naturalistico ed archeologico; esempi significativi in tal senso sono il Parco naturale delle Biancane a Monterotondo Marittimo (Foto 2), inserito nel più ampio contesto del Parco tecnologico e archeologico delle Colline Metallifere grossetane, il Complesso Termale etrusco - romano di Sasso Pisano ed il Museo della Geotermia di Larderello (entrambi nel territorio comunale di Pomarance). La valorizzazione di tali aspetti può determinare un cospicuo sviluppo turistico delle zone implicate, permettendo di far conoscere ad un vasto pubblico parti della Toscana altrimenti periferiche rispetto ai tradizionali itinerari legati alle città d'arte.

Testi citati

Albarelo D., Batini F., Bianciardi P., Ciulli B., Spinelli E. & Viti M. (2005) - *Stress field assessment from ill-defined fault plane solutions: an example from the Larderello geothermal field (western Tuscany, Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. Spec. 3: 187-193.

Arias A., Dini I., Casini M., Fiordelisi A., Perticone I. & Dell'Aiuto P. (2010) - *Geoscientific feature update of the Larderello-Travale geothermal system (Italy) for a regional numerical modeling*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010: 1-11.

Aubouin J., Debelmas J. & Latreille M. (1980) - *Les chaînes alpines issues de la Téthys: Introduction générale*. Mem. B.R.G.M., 115: 7-12.

Axelsson G. (2012) - *Role and management of geothermal reinjection*. Presented at "Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells", organized by UNU-GTP and La Geo, in Santa Tecla, El Salvador, March 11-17, 2012: 1-21.

Barelli A., Ceccarelli A., Dini I., Fiordelisi A., Giorgi N., Lovari F. & Romagnoli P. (2010) - *A Review of the Mt. Amiata geothermal system (Italy)*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010: 1-6.

Bellani S. & Della Vedova B. (2004) - *2-D thermal modelling across the geothermal fields of Tuscany, Italy*. Eos Trans, AGU, 85 (47), Fall Meeting, Abstract T43B-1326.

Bertani R. (2016) - *Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report*. Geothermics, 60: 31-43.

Braun T., Dahm T., Kruger F. & Ohrnberger M. (2016) - *Does geothermal exploitation trigger earthquakes in Tuscany?* EOS, American Geophysical Union, 97.

Cataldi R., Mongelli F., Squarci P., Taffi L., Zito G. & Calore C. (1995) - *Geothermal ranking of Italian territory*. Geothermics, 24: 115-129.

Decandia F.A., Lazzarotto A. & Liotta D. (1993) - *La "Serie Ridotta" nel quadro dell'evoluzione geologica della Toscana meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., 49: 181-190.

Di Pippo R. (2012) - *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, Third Edition*. Butterworth-Heinemann by Elsevier Ltd, Oxford (UK), 598 pp.

Di Pippo R. (2015) - *Geothermal power plants: evolution and performance assessments*. Geothermics, 53: 291-307.

Ebigbo A., Niederau J., Marquart G., Dini I., Thorwart M., Rabbel W., Pechner R., Bertani R. & Clauser C. (2016) - *Influence of depth, temperature, and structure of a crustal heat source*

on the geothermal reservoirs of Tuscany: numerical modelling and sensitivity study. Geothermal Energy, 4,5: 1-29.

Elter P., Giglia G., Tongiorgi M. & Trevisan L. (1975) - *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to present) evolution of the Northern Apennines*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 17: 3-19.

Fulignati P., Marianelli P., Sbrana A. & Ciani V. (2014) - *3D Geothermal modelling of the Mount Amiata hydrothermal system in Italy*. Energies, 7: 7434-7453.

Lazzarotto A. (1993) - *Elementi di geologia*. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", Pizzi Ed., Milano, 19-88.

Lazzarotto A. & Pascucci V. (1998) - *Aspetti geologici e geomorfologici del territorio senese*. In: "Le Terre di Siena - La storia, l'arte e la cultura di una provincia unica", Protagon Editori Toscani, Siena, 151-188.

Lee K.C. (2001) - *Classification of geothermal resources by exergy*. Geothermics, 30: 431-442.

Marinelli G. (1969) - *Some geological data on the geothermal areas of Tuscany*. Bulletin Volcanologique, 33 (1): 319-334.

Marinelli G. (1985) - *Il magnetismo recente in Toscana e le sue implicazioni minerogenetiche*. Mem. Soc. Geol. It., 25: 111-124.

McGarr A. (2014) - *Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection*. J. Geophys. Res. Solid Earth, 119: 1008-1019.

Minichilli F., Nuvolone D., Bustaffa E., Cipriani F., Vigotti M.A. & Bianchi F. (2012) - *Stato di salute delle popolazioni residenti nelle aree geotermiche della Toscana*. Epidemiol. Prev., 36 (5) suppl. 1: 1-104.

Piccinini D., Saccorotti G., Mazzarini F., Anselmi M. & Chiarabba C. (2014) - *Seismicity at the Larderello-Travale geothermal field (Italy)*. 2nd European conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul, Turkey, August 25-29, 2014, 1-3.

Romagnoli P., Arias A., Barelli A., Cei M. & Casini M. (2010) - *An updated numerical model of the Larderello-Travale geothermal system, Italy*. Geothermics, 39: 292-313.

Shapiro S.A. & Dinske C. (2009) - *Fluid-induced seismicity: pressure diffusion and hydraulic fracturing*. Geophysical Prospecting, 57: 301-310.

Stabile T.A., Giocoli A., Perrone A., Piscitelli S. & Lapenna V. (2014) - *Fluid injection induced seismicity reveals a NE dipping fault in the southeastern sector of the High Agri Valley (southern Italy)*. Geophys. Res. Lett., 41: 5847-5854.

Yang D., Li Q. & Zhang L. (2015) - *Propagation of pore pressure diffusion waves in saturated porous media*. J. Applied Physics, 117, 134902, 1-5.

Aqua et igni: scienza e senso del sacro delle acque termali per gli Antichi

Carmelo Cannarella*, Valeria Piccioni*

*Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologie Chimiche, Gruppo Per la Facilitazione e Disseminazione, Area della ricerca RM 1, Via Salaria Km 29,30 - 00015 Montelibretti (RM)
Email: carmelo.cannarella@cnr.it, valeria.piccioni@cnr.it

“Bisogna sempre considerare l'intero Universo come un organismo vivente con un'unica sostanza ed un'unica anima”

Marco Aurelio

Introduzione

L'interesse che gli antichi romani hanno avuto per l'elemento "acqua" e per le acque termali in particolare, è arcinoto. Ne abbiamo testimonianze in tantissime opere letterarie (Lucrezio, Plinio, ecc.) e, soprattutto, in espressioni architettoniche di grande rilievo: ancora oggi impressionano per l'elevato livello di sviluppo tecnico e, nonostante l'incessante opera di demolizione e di devastazione perpetrata nel tempo e che in non pochi casi prosegue tuttora, continuano a connotare in modo marcato il territorio del nostro Paese. Basta pensare ai grandi acquedotti e ai sistemi di canalizzazione, alle cisterne che in alcuni casi potevano raggiungere dimensioni decisamente notevoli, alle reti fognarie, alle piccole e grandi fontane presenti nelle città, nei piccoli borghi e nelle campagne, alle macchine che utilizzavano l'acqua come forza motrice. Impossibile, poi, non citare le piccole e grandi strutture (sia pubbliche che private) che utilizzavano l'acqua per l'igiene personale, lo svago, la cura della persona: si tratta dei "bagni" e delle "terme" che erano presenti un po' ovunque e che nella città di Roma raggiunsero dimensioni decisamente ragguardevoli. Solitamente quelle

che indichiamo come "terme" venivano chiamate dai romani con il termine generico di *aquae* ed erano diffuse in tutto l'Impero. Queste strutture, costituite da edifici ed impianti, si presentano oggi sotto forma di ruderi tutto sommato modesti; anche le antiche sorgenti risultano spesso esaurite o con le acque deviate e sfruttate per altri scopi.

Sin dai tempi più antichi i bagni in acqua furono impiegati non solo per la pulizia del corpo e per l'azione rinfrescante ma anche per specifiche proprietà salutari e curative. La combinazione di bagni caldi e freddi, attraverso le fasi di riscaldamento, raffreddamento, umidificazione e asciugatura, veniva considerata come una via per raggiungere l'armonia del corpo e dello spirito. Recarsi alle terme in epoca romana era molto comune e popolare, anche perché era una delle poche attività realmente accessibili ed



Foto 1. Una delle vasche del Bulicame di Viterbo.

aperte a tutti. Già dal I secolo a.C. il ricorso a trattamenti con le acque era un fatto di portata generale attestato dalla diffusione di strutture pubbliche e private fatte costruire dai cittadini più facoltosi, fino a diventare un vero e proprio “must” per una città moderna (per l’epoca) degna di questo nome.

Asclepiade, Celso, Sorano, Vitruvio e Plinio il Vecchio riportano ampie testimonianze dell’importanza delle acque sia come “meraviglia” della Natura, sia per le proprietà salutistiche e mediche; forniscono, inoltre, una lista dettagliata di sorgenti note per le loro peculiarità.

In latino esistono parecchi termini per indicare i “bagni” e la pratica di effettuare i bagni: *balineum*, *balineae* e *balneum*. Il *balineum* (di acqua calda) non aveva niente a che vedere con l’uso di piscine convenzionali e nemmeno con le sorgenti di acque curative (*medicatae fontes*) che si collocavano in una dimensione completamente diversa. Esso rappresentava l’attività di fare bagni salutistici e medicali in acque riscaldate artificialmente all’interno di strutture dove venivano effettuate le abluzioni prescritte dai medici (Plinio il Vecchio, Celso). La parola *thermae*, dedicata a edifici specifici destinati ad ospitare i bagni e le relative attività, non viene praticamente mai usata da Celso; Plinio il Vecchio la utilizza, invece, per ricordare le grandi strutture imperiali di Roma dove erano presenti biblioteche, palestre, giardini, teatri e grandi piscine con acque che non avevano particolari proprietà curative.

A Roma, come avveniva in tutte le culture dell’antichità, si attribuiva grande importanza alle acque di sorgente perché si riteneva che fossero utili per curarsi e, addirittura, potessero prevenire l’insorgenza di malattie; questo è il motivo per cui nelle immediate vicinanze si svilupparono veri e propri centri, spesso non distinguibili dalle *balineae* dove le acque venivano riscaldate attraverso il ricorso a complessi e sofisticati sistemi.

Nel *De Architectura* di Vitruvio l’acqua e le sue proprietà vengono esaminate in modo scientifico ed approfondito.

Neque enim calidae aquae est ulla proprietas, sed frigida aqua, cum incidit percurrens in ardentem locum, effervescit et percalefacta egreditur per venas extra terram. Ideo diutius non potest permanere, sed brevi spatio fit frigida. Namque si naturaliter esset calida, non refrigeraretur calor eius. Sapor autem et odor et color eius non restituitur, quod intinctus et commixtus est propter naturae raritatem (8, 2, 9).

“L’acqua calda di per sé non ha infatti alcuna proprietà, mentre quella fredda, quando scorrendo attraversa un luogo infuocato, ribolle e, surriscaldata, fuoriesce dalla terra attraverso le fessure. Tuttavia non può restare calda per lungo tempo, e in breve tempo ritorna fredda: infatti, se fosse calda per sua stessa natura, il suo calore non si affievolirebbe. Il sapore, l’odore e il colore però non ritornano allo stato originario, perché si impregnano di altre e si contaminano a causa della natura poco compatta dell’acqua stessa”.

La scoperta dell’“acqua calda”

Le acque termali attiravano un’attenzione particolare per le loro accertate proprietà curative: Vitruvio ne fornisce una classificazione con le varie indicazioni terapeutiche.

Omnis autem aqua calida ideo [quod] est medicamentosa, quod in parvis rebus percocta aliam virtutem recipit ad usum. Nam sulphurosi fontes nervorum labores reficiunt percalefaciendo exurendoque caloribus e corporibus umores vitiosos. Aluminosi autem, cum dissoluta membra corporum paralyti aut aliqua vi morbi receperunt, fovendo per patentes venas refrigerationem contraria caloris vi reficiunt, et hoc continenter restituuntur in antiquam membrorum curationem. Bituminosi autem interioris corporis vitia potionibus purgando solent mederi (8, 3, 4).

“Tutte le acque calde sono medicamentose, poiché, in seguito a cottura, acquisiscono particolari proprietà per uso terapeutico. Le sorgenti ricche di zolfo guariscono le malattie nervose, surriscaldando e bruciando gli umori malsani, che, grazie all’azione del calore, vanno via dal corpo. Quelle a base di allume, se usate nel trat-

tamento delle membra indebolite da paralisi o da altre patologie, agiscono sul freddo attraverso i pori aperti e risanano grazie all’energia contraria del calore, e così gradualmente si recuperano le precedenti funzionalità motorie. Quelle bituminose, poi, assunte per via orale, curano in molti casi i disturbi interni grazie all’effetto purgativo”.

Questi tipi di acque solitamente presentavano un sapore ed un odore decisamente sgradevole: tuttavia Vitruvio evidenzia che non è sempre così data la presenza di importanti eccezioni.

Sunt autem etiam nonnulli fontes calidi, ex quibus profluit aqua sapore optimo, quae in potione ita est suavis, uti nec fontalis ab Camenis nec Marcia saliens desideretur. Haec autem ab natura perficiuntur his rationibus. Cum in imo per alumen aut bitumen seu sulphur ignis excitatur, ardore percanefacit terram, quae est supra se; autem fervidum emittit in superiora loca vaporem, et ita, si qui in iis locis, qui sunt supra, fontes dulcis aquae nascuntur, offensi eo vapore effervescunt inter venas et ita profluunt incorrupto sapore (8, 3, 1).

“Ci sono inoltre alcune sorgenti calde, da cui sgorga un’acqua dal sapore ottimo, tanto gradevole che può essere bevuta da non far rimpiangere la fonte delle Camene o l’Acqua Marcia. E’ la Natura che le rende così. Perché nelle profondità del sottosuolo per effetto dell’allume, del bitume o dello zolfo si genera un fuoco, che surriscalda gli strati superiori del terreno: si genera in essi un vapore molto caldo e quindi, se in questi strati superiori nascono sorgenti di acqua dolce, le stesse acque, investite da questo vapore, ribollono nelle vene della terra ed escono in superficie senza alterazioni di sapore”.

Del resto Vitruvio fa notare che esiste anche il fenomeno contrario ovvero:

Sunt etiam odore et sapore non bono frigidi fontes, qui ab inferioribus locis penitus orti per loca ardentia transeunt et ab eo per longum spatium terrae percurrentes refrigerati perveniunt supra terram sapore odore coloreque corrupto, uti in Tiburtina via flumen Albula et in Ardeatino fontes

frigidi eodem odore, qui sulphurati dicuntur, et reliquis locis similibus. Hi autem, cum sunt frigidi, ideo videntur aspectu fervere, quod, cum in ardentem locum alte penitus incidunt, umore et igni inter se congruentibus offensa vehementi fragore validos recipiunt in se spiritus, et ita inflati vi venti coacti bullientes crebre per fontes egrediuntur (8, 3, 2).

“Esistono anche sorgenti fredde dall’odore e dal sapore sgradevole, le cui acque, nate nelle profondità del suolo dagli strati più bassi passano attraverso luoghi pieni di fuoco, e da lì, dopo un lungo percorso all’interno della terra, arrivano in superficie raffreddate ed alterate nel sapore, nell’odore e nel colore, come accade nel caso del fiume Albula sulla via Tiburtina, delle fonti fredde nell’Ardeatino e di altre simili località, che per il particolare odore sono dette solforate. Queste acque, anche se sono fredde, tuttavia alla vista sembra che bollano, perché, quando attraversano luoghi ardenti negli strati più profondi del sottosuolo, si incontrano l’elemento liquido e il fuoco, e in seguito a questo scontro, che provoca una violenta rottura, le acque ricevono al loro interno forti masse d’aria; e così aumentate di volume, spinte dalla pressione di quest’aria, escono attraverso le sorgenti con fitte bolle”.

Vi erano poi pareri discordanti sulla salubrità di queste acque “speciali”: basta pensare a Seneca che nelle sue *Naturalis Quaestiones* scrive:

At quare aquis sapor varius? Propter quattuor causas: ex solo prima est per quod fertur; secunda ex eodem, si mutatione eius nascitur [...]. Interest utrum loca sulphure an nitro an bitumine plena transierint; hac ratione corruptae cum vitae periculo bibuntur 3, 20, 1-2.

“Perché varia il sapore dell’acqua? Per quattro motivi: in primo luogo dipende dalle caratteristiche del suolo attraverso il quale l’acqua scorre, e poi dallo stesso terreno se per caso intervengano cambiamenti [...]. E’ sempre importante capire se le acque passano attraverso luoghi intrisi di zolfo, di salnitro o di bitume, poiché, alterate da questi composti, se assunte possono risultare fatali”.

Ed inoltre:

[...] *uti multo meliora inveniantur capita fontium [...], nisi si inciderint in sulphurosus locum aut aluminosus aut bituminosus. Tunc etiam permutantur aut calidae aquae aut frigidae odore malo et sapore profundunt fontes* (8, 2, 8).

“[...] si troveranno fonti di gran lunga migliori [...], se le acque non siano passate attraverso un terreno solforoso, alluminoso o bituminoso. In tal caso, infatti, si alterano, e sia le acque calde sia le fredde zampillano dalle sorgenti con un cattivo odore e un cattivo sapore”.

La scienza romana antica distingueva quindi le sorgenti di acque calde curative secondo la seguente classificazione:

- sorgenti di acque alluminose utili per favorire il recupero della funzione motoria, per il trattamento delle paralisi; il calore dell'acqua apre i pori della pelle.
- sorgenti di acque bituminose per aiutare a ripristinare il corretto metabolismo
- sorgenti di acque alcaline per curare le infiammazioni delle ghiandole linfatiche (scrofolosi)
- sorgenti di acque acide per combattere i calcoli renali e per risolvere le conseguenze dell'ubriachezza
- sorgenti di acque solfuree per purificare il corpo, aprire i pori della pelle, tonificare i muscoli, curare i reumatismi

Plinio il Vecchio cita molte acque che avevano proprietà di guarire le ferite, la gotta e la sciatica, rimediare alla febbre, curare le slogature, le fratture e la psoriasi, rimediare alle malattie degli occhi e delle orecchie nonché ai problemi della pelle, dello stomaco e dell'intestino. Il ricorso a queste acque, in particolare a quelle di *Cutilia* vicino Rieti o a quelle solfuree (*Aquae Albulae*) fra Roma e Tivoli, veniva proprio raccomandato dai medici.

Come già detto, intorno alle sorgenti si sviluppavano degli stabilimenti di cura che oggi potremmo definire “termali”, delle vere e proprie “spa” che attiravano un gran numero di perso-



Foto 2. La “Lettighetta”, edificio a pianta quadrata posto a lato della antica via Cassia nei pressi delle terme del “Bagnaccio” (VT). Resti romani di un tempio, di una tomba o di antiche terme?

ne che vi si recavano per “passare le acque”. Le strutture più rinomate e certamente più eleganti erano quelle situate presso Baiae, sulla costa campana a nord di Napoli. Qui, grazie alla bellezza del paesaggio, la mitezza del clima e le particolari proprietà curative delle acque solfuree, si era sviluppato un fiorente turismo di persone benestanti, tanto che i personaggi facoltosi di Roma, dell'Impero e addirittura gli stessi Imperatori avevano eletto questa zona come “buen ritiro” estremamente privilegiato. I ricchi disponevano di spa private nelle loro ville lungo il litorale e la stessa Baiae ospitava *resort* con tutti i *comfort* che rendevano le terapie un'esperienza di lusso difficilmente reperibile altrove (gli stabilimenti termali, presenti un po' ovunque, avevano livelli più modesti). Quando i romani trovavano sorgenti di acque solfuree e minerali, anche nei territori di recente conquista, subito si affrettavano a mettere in piedi delle vere e proprie spa. L'interesse per queste sorgenti nei nuovi territori non era di certo casuale: spesso vi venivano realizzate strutture specificatamente destinate al ricovero e al recupero fisico dei militari feriti o malati, soprattutto dopo un periodo bellico intenso. Un esempio è fornito dalla spa di Baden in Svizzera (*Aquae Helveticae*), che sembra servisse per curare i militari della legione di stanza nei pressi di Vindovissa. Appare quindi sufficientemente chiaro che le acque e le sorgenti (in particolare quelle di



Foto 3. Uno dei rivoli di acqua sulfurea delle terme del Bulicame di Viterbo.

acque calde solfuree) venivano identificate come fortemente caratterizzanti la cultura, la civiltà e la stessa vita quotidiana della romanità: è quindi inevitabile che lo studio di questo peculiare aspetto coinvolga molte discipline scientifiche tra cui l'archeologia, l'epigrafia, la filologia, l'antropologia e la geologia. Tuttavia, se ci limitassimo ad una valutazione esclusivamente scientifica e tecnica, giungeremmo ad una visione parziale e limitata di questo tema perché amputata di una componente altrettanto cruciale: quella religiosa e spirituale. Il Divino rappresenta, infatti, un punto essenziale per comprendere sia il significato degli elementi naturali, sia la modalità attraverso la quale essi venivano osservati, studiati e considerati. In altre parole, la Natura ed i relativi fenomeni erano visti secondo una prospettiva in cui le considerazioni scientifiche e fisiche erano indissolubilmente legate a quelle spirituali e metafisiche.

Il senso del Sacro

Per i romani (e per tutti i popoli dell'antichità) l'importanza dell'acqua e delle sorgenti è sempre andata oltre le mere questioni pratiche di pulizia, igiene e salute perché, come ampiamente testimoniato dai testi letterari e dalle evidenze archeologiche, includeva l'esistenza di un considerevole e sostanziale valore religioso. In prossimità di sor-

genti, soprattutto di acque dalle proprietà particolari, è abbastanza comune rinvenire in Italia spazi sacri (spesso erano sopravvissuti come tali anche dopo l'avvento del Cristianesimo) rappresentati da grandi santuari monumentali, edicole votive, radure, altari isolati e altro. Non solo a Roma e nelle altre città, ma anche nelle campagne, sulle montagne, lungo i corsi d'acqua, i laghi e le strade, nelle foreste ecc., sorgevano testimonianze dell'importanza che le comunità attribuivano al legame tra Natura e Divino. E' evidente che i romani portarono alla massima espressione (tecnica, scientifica e spirituale) una tradizione che si era sedimentata nel corso dei secoli e che si esprimeva attraverso forme architettoniche, conoscenze scientifiche e pratiche curative da un lato, un cospicuo *corpus* di saperi spirituali tradotto in rituali, liturgie e pratiche culturali dall'altro. Tutto questo si innestava su contesti preesistenti (come nel caso dell'Etruria o dei territori dei Sanniti) e si fondeva in un *unicum* tale da caratterizzare marcatamente lo stesso concetto di “Romano”. Essere “Romani” o “Romane” voleva dire condividere un'etica precisa fondata su un substrato culturale composto anche dalla condivisione di valori e pratiche culturali risultanti dalla fusione religiosa continua di culture e tradizioni diverse. Per noi appare difficile comprendere questa elasticità, questo potere amalgamante detenuto dalla spiritualità antica: essa si fondeva sulla pluralità non solo per la presenza di molteplici espressioni del Divino, ma anche per la capacità di assimilare e fondere credi provenienti da una Tradizione Primordiale Unitaria che si manifestava sotto forme e denominazioni diverse. Ancora più difficile è comprendere la stretta compenetrazione che nelle culture antiche esisteva fra scienza e spiritualità, fra fisica e metafisica, fra razionalità e misticismo. Da questo punto di vista la civiltà contemporanea si presenta come una vera e propria anomalia del tutto priva di qualsiasi contatto con la spiritualità antica. Essendo la sfera spirituale una componente essenziale ed indissolubile dal pensiero antico, questa profonda frattura che si è determinata rende estremamente difficile comprendere in modo



Foto 4. Frammenti di opere murarie romane presso le terme del Bulicame di Viterbo.

reale e completo il senso ed il valore delle antiche culture. Inoltre, è importante sottolineare che questa premessa non costituisce una precisazione metodologica e teorica: la differenza fra Antichi e Moderni in Occidente si fonda non solo su un diverso modo di pensare, ma soprattutto su un diverso modo di “conoscere” e di relazionarsi con il mondo. In tal modo risulta completamente differente “l’esperienza umana della natura” e dell’esistenza stessa. La scienza e la tecnologia contemporanee rappresentano l’anello conclusivo di un lungo processo che ha portato a considerare la Natura come un reticolo di fenomeni (spesso analizzati e considerati completamente slegati l’uno con l’altro) organizzati secondo leggi, formule e teorie ma svuotati di qualsiasi riferimento spirituale. Anche quando si parla di spiritualità emergono profonde differenze con il mondo passato. Quella antica, anche con le sue liturgie e riti, era parte integrante della “normalità” e ne costituiva un elemento essenziale per relazionarsi e comprendere le manifestazioni del reale che si pongono al di sopra dell’esistenza in senso fisico e profano. In altre parole, la spiritualità antica non ha nulla della devozione passionale, emotiva e sentimentale relegata nella dimensione esclusiva della religione. Il Divino, con la sua pluralità di manifestazioni, non ha una valenza meramente naturalistica anche se gli dei e le dee occupavano ogni aspetto del reale e della Natura. Queste forme super-esistenziali dell’Essere non si muo-

vono in una dimensione quantitativa e spaziale ma, in primo luogo, all’interno della dimensione dello Spirito, come sorgenti, fonti creatrici e generatrici. Tale spiritualità diviene, pertanto, una forma di conoscenza (alcuni la considerano una “non-conoscenza”) che non fonda le sue basi su dimostrazioni logiche, ma su esperienze trascendenti che talvolta possono condurre a conclusioni simili o analoghe a quelle fornite dalla Scienza. Quest’ultima si sforza di comprendere come funziona la Natura, ma non fornisce risposte alla domanda su cosa sia la Natura, descrive come funziona un albero, ma non cosa sia un albero. La Natura ed il mondo, quindi, non erano semplicemente “pensati”, ma “vissuti” come manifestazione sensibile dell’invisibile di una realtà fisica, metafisica e sacra.

Tornando alla spiritualità come forma di conoscenza, essa è da considerarsi la risultante non solo di ragionamenti e osservazioni ma anche di intuizioni e visioni che venivano trasmesse in modo iniziatico e nelle forme di misteri impregnanti i domini dell’essere e dell’agire umano (la coltivazione della terra, la conoscenza medica, l’architettura, ecc.). Il rapporto con il Divino, nel Tempo Sacro e negli spazi compresi dalla Geografia Sacra, è quindi un’esperienza reale, non ideale, esattamente come avviene per i fenomeni fisici. In questo modo l’osservazione del mondo e della Natura avveniva simultaneamente all’interno di una dimensione fisica e di una spirituale e l’immagine “fredda” di un fenomeno acquisiva un significato, un senso e una logica.

Grazie a questa integrazione nell’antichità non esisteva il conflitto fra le due dimensioni: basta pensare a figure come Pitagora o la scienziata Ipazia che non le separavano ma le integravano come visioni complementari di questo Grande Tutto. La fisica, la geometria, la matematica, l’astronomia erano allo stesso tempo espressioni di una teologia, di una trascendenza in cui i risultati delle osservazioni dei sensi erano arricchite dalle intuizioni spirituali e metafisiche della realtà sovra sensibile. Scienza spirituale e scienza naturale erano un tutt’uno, una conoscenza unitaria che si

esprimeva con gli stessi simboli e lo stesso linguaggio. Se si entra in questa prospettiva è possibile allora costruire una vera e propria traslazione nei significati, nei concetti, nei principi: all’interno di questa accezione più ampia la comprensione dell’antichità non diventa più una questione di archeologia, letteratura, filologia, filosofia o storia perché ci si è spostati su un piano completamente diverso, quello “vivente”.

Le Acque, le Fonti, le Sorgenti

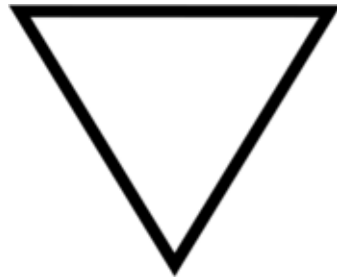
Senza l’Acqua Divina nulla esiste
Zosimo

Questa lunga premessa è un passo indispensabile per comprendere come l’acqua (sottoforma di sorgenti, fonti, fiumi, torrenti, laghi, ecc.) rappresentasse un elemento critico per disegnare una vera e propria Geografia Sacra (con un reticolo di percorsi, itinerari, vie e sentieri visibili ed invisibili che collegavano i punti critici di questa topografia) che connotava in particolare la penisola italiana. I luoghi dove l’acqua manifestava la propria peculiarità, esprimevano la presenza di forze ed energie per cui appaiono in primo luogo come numi portatori di culti specifici. A Roma e nel resto d’Italia i luoghi sacri ospitavano varie forme di santuari (molti dei quali risalenti ad epoche molto antiche) in cui l’acqua era un elemento centrale per lo svolgimento dei riti, in particolare di quelli di purificazione (*lustratio*). Molti giorni del calendario sacro implicavano, infatti, riti di purificazione con l’acqua: *Fortuna Virilis* e *Venus Verticordia* (1 Aprile), *Parilia* (21 Aprile), *Lemuria* (9, 11, 13 Maggio), *Mercurio* (15 maggio), *Ambarvalia* (29 Maggio), *Vestalia* (9 Giugno), *Ludi Romani* (5 – 19 Settembre). Questi potevano essere molto diversi fra di loro ma il ruolo dell’acqua rimaneva invariato. L’uso rituale dell’acqua si ritrova, ad esempio, anche nel culto della Venere Cloacina o della *Magna Mater*; in quest’ultimo caso il rito prevedeva la pulizia con acqua (*lavatio*) dell’immagine della dea all’interno del suo tempio sul Palatino o nel fiume Almo.

Numerose divinità e ninfe caratterizzavano i luoghi acquatici rendendoli sacri. Dell’elenco molto lungo e complesso merita citare per primi Nettuno (a differenza del dio greco Poseidone, a cui comunemente è assimilato, è da collegarsi non solo al mare ma anche all’acqua dolce; la festività, *Neptunalia*, cade il 23 luglio) e la sua polarità femminile Salacia. A Roma le divinità principali legate all’acqua erano le *Camenae*, ovvero *Egeria*, *Carmenta* (che aveva anche un suo *flamen* specifico), *Antevorta* e *Postvorta*, energie divine connesse con la generazione e la profezia; ad esse va aggiunto poi il Tevere (il cui nome divino era *Voltumnus*), un fiume sacro la cui festività (*Volturnalia*) cadeva il 27 agosto. Altre festività maggiori erano le *Juturnalia* (11 Gennaio) e le *Fontinalia* (13 Ottobre) dedicate rispettivamente a *Juturna* e a *Fons Juturna* e *Fons*. In esse veniva sacralizzato l’aspetto *fons et origo* dell’acqua ovvero l’elemento primordiale che raccoglie le potenzialità dell’esistenza. La caratteristica di essere *origo* spiega sia perché *Fons/Fontus* siano legati a Giano, dio degli Inizi, sia lo stesso principio di “ciclicità” e di “divenire” per cui si delinea ciò che precede qualsiasi forma e ogni creazione. Questa ciclicità visibile/invisibile corrisponde al rapporto immersione/emersione in cui l’emersione è l’atto cosmogonico della manifestazione, mentre l’immersione rappresenta la dissoluzione. In altre parole, l’acqua (elemento di rigenerazione) evidenzia il ciclo vita-morte.

La primordialità dell’acqua connota ogni principio “umido” indifferenziato: le acque sono sempre connesse con la polarità femminile, la Luna, la materia, la vitalità. L’acqua è considerata un elemento di purificazione ma quella di sorgente non solo purifica ma anche “salva”. Per questo fra i vari simboli di Giano è inclusa una Barca.

Non è possibile poi non menzionare Venere, la Forza Generatrice che si cela nella Natura e che è rappresentata dall’energia vitale e purificatrice dell’acqua. Non è un caso, infatti, che la “V” del nome ed il simbolo della dea (a forma di cono) costituiscano anche il simbolo dell’acqua che a sua volta richiama l’organo genitale femminile. Vene-



re è definita “*mortis et vitae locus*” per cui la forza divina contiene in sé la vita e la morte.

Da un punto di vista religioso e spirituale tutte le forme di espressione dell’acqua erano importanti, ma quelle considerate “viventi” o dotate di proprietà curative assumevano un ruolo decisamente speciale (fra l’altro coinvolgevano la presenza di un’altra forza divina, quella di Minerva Medica). Nel loro ambiente certamente spiccano le sorgenti di acque sulfuree dove si concentrano, oltre quelle già citate, un gran numero di divinità specifiche. Come testimoniato da alcune iscrizioni, la tutela e la custodia di questi luoghi sacri (spesso lontani dai centri abitati) erano affidate a gruppi organizzati di *magistri* o *collegia*.

Mefitis e le sorgenti di acqua sulfurea

Nelle sue *Naturalis Questionae* Seneca sottolineava come l’acqua calda di sorgente era di solito associata alla presenza di zolfo:

Quidam existimant per loca sulphure plena vel nitro euntes aquas calorem beneficio materiae per quam fluunt trahere. Quod ipso odore gustuque testantur; reddunt enim qualitatem eius qua caluere materiae. (QNat. III. 24. 4)

“C’è chi sostiene che l’acqua che passa attraverso luoghi pieni di zolfo o nitrato assume il calore delle proprietà del materiale attraverso il quale scorre. L’acqua indica questo per il suo particolare odore e gusto, perché riproduce la qualità del materiale che lo rendeva caldo”.

Nelle descrizioni di Plinio e Vitruvio si era invece giunti alla conclusione che non tutte le acque calde

erano sulfuree, ma che quella sulfurea aveva sempre un odore sgradevole dovuto allo zolfo. In mezzo a tante elucubrazioni di pensatori, balza agli occhi il parere di Servio. Egli ricordava che tutte le sorgenti erano da considerarsi sacre (*nullus enim fons non sacer*) e attribuiva l’odore sgradevole delle acque sulfuree alla presenza di una particolare forza divina avente in sé una polarità maschile ed una femminile:

Mephitin mephitis proprie est terrae putor, qui de aquis nascitur sulphuratis, et est in nemoribus gravior ex densitate silvarum.

“Il terribile fetore della terra, che viene dalle acque sulfuree, appartiene a Mefitis ed è più forte nei boschi a causa della densità degli alberi”.

Alii Mephitin deum volunt Leucotheae conexum, sicut est Veneri Adonis, Dianae Virbius. Alii Mephitin Iunonem volunt, quam aerem esse constat. Novimus autem putorem non nisi ex corruptione aeris nasci, sicut etiam bonum odorem de aere incorrupto, ut sit Mephitis dea odoris gravissimi, id est grave olentis. (Serv. ad Aen. VII. 84)

“C’è chi pensa che il Dio Mefitis sia collegato a Leucotea proprio come Adone è collegato a Venere e Virbio a Diana. Altri vogliono che Mefitis sia Giunone perché si sa che sia aria. Inoltre sappiamo che l’odore fetido non si verifica se non c’è una contaminazione dell’aria, così come un odore piacevole nasce dall’aria pura; allo stesso modo Mefitis è la Dea dell’odore sgradevole, perché l’aria è contaminata dalla puzza”.

A fianco delle diverse spiegazioni ecco che appare *Mefitis*, una divinità di grande importanza per le popolazioni dell’Appennino centrale ma del tutto nuova per il pantheon romano. Pur disponendo di un santuario sull’Esquilino, non casualmente presso il Tempio di Giunone Lucina e Venere Libitina, con un boschetto sacro (*Lucus*) ed un sacrario (*Aedes*), una delle sue caratteristiche era quella di non essere una dea urbana (analogamente alla dea Feronia o ad altre *potnie* italiche i cui santuari erano posti distanti dai

luoghi abitati). Nei dintorni di Roma *Mefitis* era rappresentata in prossimità del sito delle *Aquae Albulae* a Tivoli e nella località “Solfatarà” di Tor Tignosa (a metà strada tra Pratica di Mare e Albano Laziale).

Secondo Tacito (*Historia*, III, 33) un tempio di Mefitis era posto fuori dalle mura di Cremona; fra l’altro, a Laus Pompeia (Lodivecchio) è stata ritrovata un’iscrizione votiva dedicata alla dea. Il suo culto, molto sentito nell’Italia centrale (soprattutto nelle aree di cultura tosco-sannitica), era comune lungo la dorsale appenninica fino in Sicilia. Testimonianze in questo senso provengono anche dal santuario di Rossano di Vaglio in Basilicata (frequentato non solo dalle comunità locali ma anche da pellegrini di altre regioni) e da quello di Aquinum in Provincia di Frosinone (in proposito si segnala che nei pressi si ritrovano la località Mefete ed il Fiume Melfa). Quello più conosciuto (numerosi citazioni letterarie antiche, resti archeologici, iscrizioni votive e ex voto), comunque, è il santuario di *Ampsantus* a Rocca S. Felice in Provincia di Avellino. Del sito è certamente da rilevare la suggestiva morfologia che da sempre ha suscitato un particolare interesse. I luoghi associati a *Mefitis* e la stessa dea sono collegati, infatti, al mondo infero e a quelle energie che hanno la capacità di riunire i quattro elementi fondamentali dell’universo: acqua, fuoco, terra e aria. In tale mondo sotterraneo il fuoco fonde le rocce ed i metalli, l’acqua si



Foto 5. Una delle sorgenti principali del Bulicame di Viterbo. In questa immagine Mefitis sembra letteralmente “imprigionata” come un mostro, pronta ad emergere dal sottosuolo. Le barriere di sicurezza servono a proteggere Mefitis dall’umanità o viceversa?

trasforma in vapore e i gas più nascosti si liberano per risalire verso la superficie della terra; *Mefitis* è pertanto un’emanazione diretta di *Tellus* poiché deriva «dall’Utero della Terra». Nei luoghi dove la dea è presente la vita fa molta fatica ad imporsi: non ci sono piante, non ci sono animali, solo acque sulfuree, acquitrini melmosi e ristagnanti, vapori nauseabondi. Il Divino, rappresentato da *Mefitis*, delinea una Geografia Sacra che si sovrappone, accompagna e sostiene in primo luogo una geografia fisica e poi una culturale-culturale. In questi spazi ben individuati, dove si invocava la divinità, questa poteva dare la morte con le sue proprietà oppure poteva essere benefica verso gli uomini e gli animali guarendoli con le acque sulfuree. Inoltre, i vapori che fuoriuscivano dalla terra potevano far entrare in *trance* le persone per cui i luoghi “mefitici” erano considerati oracolari e dedicati alla divinazione (come del resto avveniva presso l’oracolo di Delfi).

Geografia Sacra e omphalos

Anche se non esplicitamente riportato nei testi antichi o nelle iscrizioni, il culto di *Mefitis* appare legato alle *acque di guarigione* in generale, a quelle sulfuree in particolare. Nel caso delle sorgenti sulfuree, come quella di *Ampsantus*, la dea si manifestava nel mondo determinando uno spazio



Foto 6. Particolare di una delle sorgenti principali del Bulicame di Viterbo.

sacro eterogeneo (connesso simultaneamente ad un Tempo Sacro) totalmente diverso da quello ordinario, profano, non pertinente al Divino. Lo spazio sacro possedeva un valore esistenziale e spirituale ben determinato: infatti, la capacità dell'acqua sulfurea di guarire era data non tanto dalle sue proprietà fisiche, quanto dalla simultanea presenza di *Mefitis* all'interno dello spazio occupato dal suo santuario. Questi luoghi divenivano sacri nel momento in cui l'individuo, non l'intera generalità astratta degli uomini, sviluppava la capacità personale di percepire la presenza del Divino che irrompeva attraverso la Natura. L'uomo e la donna antichi erano chiamati a costruire questa capacità individuale, una qualità la cui perdita progressiva ha caratterizzato l'avvio della de-sacralizzazione da parte della modernità.

Ogni luogo sacro è orientato, cioè fa riferimento a punti fissi: la particolarità dei santuari di *Mefitis* è quella di ospitare un *omphalos*, un "ombelico del mondo", un punto di riferimento assiale della Geografia Sacra. Nell'Eneide Virgilio scrive che l'*Ampsancus* (VII 563-71) si trova nel centro dell'Italia (*locus Italiae medio*). Nel commentare questo passo Servio precisa (Ad Aen. VII):

Italiae medio hunc locum umbilicum Italiae chorographi dicunt. Est autem in latere Campaniae et Apuliae, ubi Hirpini sunt, et habet aquas sulphureas, ideo gravio-



Foto 7. Una delle vasche del Bulicame di Viterbo.

res, quia ambitur silvis. ideo autem ibi aditus esse dicitur inferorum, quod gravis odor iuxta accedentes necat, adeo ut victimae circa hunc locum non immolarentur, sed odore perirent ad aquam adplicatae. Et hoc erat genus litationis. Sciendum sane Varronem enumerare quot locat in Italia sint huius modi: unde etiam Donatus dicit Lucaniae esse qui describitur locus, circa fluvium qui Calor vacatur: quod ideo non procedit, quia ait 'Italiae medio'. Ampsancti valles - loci ampSANCTI, id est omni parte sancti: quem dicit et silvis cinctum et fragoso fluvio torrente

“I geografi chiamano questo posto in mezzo all'Italia “l'ombelico d'Italia”. Il luogo si trova dove si incontrano Campania e Puglia, dove ci sono gli Hirpini; ha acque sulfuree quindi ha un odore sgradevole reso più forte perché il posto è circondato da una foresta. E per lo stesso motivo, si dice che questo posto sia l'ingresso al mondo infero perché il forte odore uccide quelli che si avvicinano; tanto è vero che le vittime sacrificali in quel luogo non vengono immolate, ma piuttosto muoiono dall'odore quando sono vicino all'acqua. E ciò era considerato comunque un segno favorevole. Va sottolineato che Varrone elenca altri luoghi come questo che ci sono in tutta Italia e che Donato, proprio sulla base dell'elenco di Varrone, afferma che il luogo che Virgilio descrive è in Lucania, da qualche parte intorno al fiume chiamato Calor. Ma questo non è di grande aiuto perché dice “in mezzo all'Italia”. La valle di Ampsanctus è il sito del fiume Ampsanctus, che è interamente sacro. Dice che è circondato da foreste e che ha un corso impetuoso”.

Al di là delle interpretazioni date a questo brano, è interessante rilevare che un ombelico d'Italia è ospitato sia dal santuario di *Mefitis* ad *Ampsancus* che a Cutilia in Sabina dove, vicino a sorgenti di acque sulfuree, esisteva un lago sacro con una caratteristica piccola isola “galleggiante e mobile”. Ci sarebbero quindi due ombelichi di Italia? Dal punto di vista della Geografia Sacra l'*omphalos* è un punto di contatto assiale tra il Mondo Infero, la Terra ed il Mondo Supero, nonché un punto di irradiazione di energia vitale. Presso le sorgenti di acque sulfuree si apriva una porta per il Mondo

Infero, la dimensione ctonia. Si tratta di un'immagine che oltre tutto è durata nei secoli: basti pensare al Bulicame di Viterbo, citato da Dante Alighieri e noto nel Medioevo come punto di accesso all'Inferno¹.

Un “*umbelicus*” si trova in un certo luogo in quanto centro assiale spirituale di un'area, di un territorio, di una regione ben determinata. Ci troviamo di fronte ad un luogo sacro in cui si manifesta una forza generatrice, quindi femminile. Come a Delfi, dove originariamente era presente il santuario della Grande Madre con il relativo oracolo poi sostituito da quello di Apollo, anche a Roma si trovava il *Mundus* e cioè uno spazio sacro circolare sormontato da un edificio di forma conica - simbolo femminile - dedicato alla dea ctonia Cerere (*Mundus Cereris*). L'accesso al Mondo Infero veniva qui aperto (*Mundus Patet*) solo tre giorni rituali all'anno (24 agosto, 5 ottobre, 8 novembre), durante i quali i defunti avevano la possibilità di congiungersi con i viventi attraverso la soglia (*Lapis Manalis*). Da ricordare, poi, che il termine *mundus* rimanda al concetto di purificazione iniziatica (mondare) ed i riti del *Mundus Patet* rimanevano momenti fondamentali per la strutturazione, l'or-

ganizzazione e l'equilibrio dell'intero calendario sacro romano.

Per le sorgenti di acque solfuree vale un simbolismo simile: in genere sono luoghi assiali di collegamento fra i tre Mondi, luoghi di pertinenza di una forza femminile ctonia che dà la guarigione ma può anche arrecare la morte, luoghi spirituali privilegiati in discontinuità qualitativa con lo spazio profano dove l'acqua - elemento apportatore di vita - purifica e cura i mali del corpo e dello spirito. In questi spazi di trascendenza è possibile discendere nel Mondo Ctonio così come salire verso il Mondo Supero, simbolicamente rappresentato dall'ascesa dei vapori verso il cielo. Il contatto fra i tre Mondi, sia pure in giorni prestabiliti e ritualizzati, era indispensabile per garantire l'equilibrio fra le forze e le energie alla base della vita. Soprattutto le forze ctonie vengono chiamate in causa in questo processo poiché la vita nasce al buio nell'Utero della Terra e questa stessa Madre raccoglie i viventi al termine del loro ciclo di vita. Qui insomma si ritrovano forze legate alla vita e alla morte, al buio e alla luce, forze benefiche e forze malefiche che in questi luoghi si riconciliano.

1. «Chi diciotto secoli indietro, moveva da Roma per l'antica via Cassia ed entrava nella regione detta assai più tardi l'Agro Viterbese, doveva esser colpito da un paesaggio di aspetto tutt'affatto singolare. Lasciati alle spalle i pittoreschi gioghi del Cimino e degradando giù a valle dalla stazione di Foro Cassio (ora Vetralla) fino al Fondo Paliano, vedeva stenderglisi dinnanzi da oriente ad occidente, una pianura biancastra, monotona, desolata, chiazzata qua e là di verde e di ciuffi d'una pallida vegetazione, fra cui grandeggiavano le mura di numerosi edifici termali, di forme e proporzioni le più svariate. A destra, verso levante, si disegnava sull'azzurro del cielo una collina a cono troncato, d'una bianchezza smagliante come neve (il Bulicame), sulla cui sommità si raggomitava incessantemente un grigio pennacchio di fumo; mentre altre linguette di fumo, sollevate da rigagnoli argentini, radevano orizzontalmente i suoi fianchi, o scendevano giù a perpendicolo, occultandosi misteriosamente nel terreno sottostante. Sul dinnanzi, una lunga striscia di strada consolare solcava dritta ed imperturbata la pianura, perdendosi a distesa d'occhio verso settentrione, tra due lontane ville, la Busseta e la Calvisiana, che con le loro cupolette scintillanti al sole, cogli edifici e i muri di cinta tramezzati da boschetti di bosso e da giardini, parevano due oasi perdute in quella melanconica contrada. Fattisi più dappresso, la scena si restringeva per l'avvallarsi della strada; ma svolgeva sempre nuovi e interessanti paesaggi. Valicati i tre ponti del Risiere, del Quinquagesimo miglio (ora S. Nicolao) ed il Camillario, si riusciva dentro un'angusta valletta, assai probabilmente chiamata fin d'allora la Valle del Caio, incavata dalle corrosioni del torrente che le scorre da un lato, e tutta screziata pure essa di verde e di bianche chiazze d'incrostazioni calcaree, ove serpeggiavano alcuni ruscelletti d'acqua fumante. Lungo la valle, e sul poggio dirimpetto, vedeano a destra e a manca della via Cassia alcune terme di epoche e costruzioni diverse, di forme ovoidali o rotondeggianti o quadrate, le cui prime fondamenta erano, forse, state piantate là dal tempo degli antichi etruschi; ma di certo erano poi state raccontate o rifatte alla maniera romana dagli abitanti della vicina città di Surrena, o da ricchi cavalieri e senatori di Roma, attratti dalla rinomanza di quelle tante sorgive minerali». C. Pinzi citato da C. Zei “Le Terme Romane di Viterbo” (http://www.bollettinodarte.beniculturali.it/opencms/multimedia/BollettinoArteIt/documents/1343826350362_5_-_Costantino_Zei_p._155.pdf).



Foto 8. Formazioni calcaree presso il Bulicame di Viterbo.

Considerazioni conclusive

Nella visione degli Antichi il mondo appare composto da un reticolo di relazioni, da differenze e da contrasti, così come da armonie: è proprio dall'unità degli opposti e dalla loro partecipazione al Tutto che scaturisce l'armonia e l'equilibrio come illustra anche il caso della dea *Mefitis* e della sua manifestazione presso le sorgenti delle acque sulfuree. In questi luoghi gli Antichi trovavano la conferma della percezione di un flusso vivificante che trova molteplici manifestazioni divine, espressioni sacralizzate di un ritmo vivente, di segni, segnali e valori di una rete in comunicazione continua che parla con un linguaggio biologico e fisico ma anche metafisico.

Le acque sulfuree con le loro proprietà curative e di guarigione (ma talora anche di morte) diventavano oggetto di riflessione scientifica così come di quella spirituale poiché il mondo materiale e quello immateriale non apparivano come entità separate ma compenstrate. L'Umanità stessa non poteva non essere parte di questa rete intrecciata ed inestricabile fatta di relazioni fisiche e spirituali. La presenza del Divino nella Natura e nel mondo era quindi percepita come un fatto non astratto e teorico ma reale e le proprietà degli stessi fenomeni fisici erano considerate come doni divini. Del resto è pur vero che:

“Bisogna infatti scrollarsi di dosso il pregiudizio, che potremmo definire primitivista, riguardante le religioni antiche: è vero che spesso le divinità erano legate ad elementi della natura, ma la venerazione loro tributata non era dovuta a tale aspetto: non si tratta di religioni animiste giunte ad un livello superiore di espressione, bensì di religioni strutturate ed articolate che riversano sulle figure divine venerate funzioni ritenute basilari per l'esistenza del gruppo e che accolgono, accanto all'elemento fisico, che potrebbe assurgere a ruolo di simbolo, un'infinita serie di risvolti e di problematiche” (Calisti, 2006).

Per comprendere meglio il senso della spiritualità antica, tuttavia, non bisogna dimenticare che nelle liturgie e nella quotidianità il *Cultor* e la *Cultrix* compivano tutti quegli atti destinati a vivere in armonia con quelle forze che riempiono la realtà. Così come i contadini essi “coltivavano gli dei/dee” (*Colere Deos/Deas*) con gli strumenti della *Pietas* e della *Virtus* per conseguire la *Pax Deorum/Dearum*. Ciò esprimeva, tra l'altro, una visione dell'esistenza e una modalità di avvicinarsi alla Terra e alla Natura sulla base del “rispetto” e della percezione del “limite” attraverso i quali l'Umanità trovava il suo giusto posto nell'ordine delle cose. Gli Antichi si muovevano nella consapevolezza che “Tutto è connesso” per cui l'Umanità fa parte integrante di questo Tutto. Se si volevano ottenere i doni della Natura era indispensabile capire il suo linguaggio e tenere presenti i segni e le voci provenienti dagli dei e dalle dee, in primo luogo come energie vivificanti la realtà e la Natura stessa.

I luoghi sacri possedevano un'identità e una dignità che li rendeva “speciali” in quanto spazi della manifestazione fisico-materiale della Natura e spirituale del Divino. Per questo motivo hanno avuto un significato e un senso nella costituzione del patrimonio culturale italiano. La “perdita di senso” attuale è da considerarsi non solo il principale nemico del patrimonio nel suo complesso, ma anche il male che affligge gli antichi luoghi di venerazione rappresentati



Foto 9. Sintomi della “perdita di senso”: rifiuti abbandonati presso il Bulicame di Viterbo.

dalle sorgenti di acque sulfuree. Nei casi migliori, infatti, queste sono soggette ad una politica di sfruttamento, in quelli peggiori sono ridotte in una condizioni di degrado e di abbandono; tutto ciò rappresenta il sintomo più palese della generale perdita di responsabilità (spaziale e temporale).

Con il passare delle generazioni, si è consolidata l'idea che l'Umanità non abbia alcun legame con la Natura se non forse attraverso un nesso esclusivamente scientifico. In genere essa la vive come un problema, come un ostacolo e non con il senso di parteciparvi tradizionalmente espresso dall'idea di *Divino*. Oggi abbiamo la percezione netta che qualcosa si sia spezzato, qualcosa si sia alterato e la qualità dei nostri rapporti con la Natura sta a dimostrare quanto grave possa essere questa frattura. Gli Antichi ci possono insegnare qualcosa a riguardo? Forse sì se teniamo presenti le tante peculiarità del “Sapere Antico” (nel significato più ampio e profondo del termine) e la grande “distanza” culturale e psicologica che ci separa da quell'*illo tempore* in cui questo sapere è andato elaborandosi. Se ci voltiamo indietro con spirito consapevole, non possiamo non accor-

gerci dell'abisso mentale che si è creato durante questi secoli, tanto da farci dire che l'Umanità non sia più la stessa. E' vero che il passato non può ritornare nello stesso modo in cui si è manifestato una volta, ma è altrettanto vero che esso può essere ripreso sotto forma di idee e valori: ciò che si è dissolto come civiltà può tornare a vivere come “principio” e “criterio”. La capacità di tornare a concepire il mondo e la vita come “fluire di energie” in relazione e sinergia fra loro, potrebbe contribuire a ritornare a percepire l'esistenza come movimento e trasformazione continua all'interno di un grande reticolo di interconnessioni. Una prospettiva della vita totalmente scientifica e tecnica tende a spezzettare, scomporre e parcellizzare la Natura in tanti tronconi, limitando l'Essere alla sola dimensione fisica perché unica sfera quantificabile e misurabile. Lo stesso è accaduto alle persone, ridotte solo alla dimensione corporale fatta di organi e sintomi separati l'uno dall'altro. Oltretutto la Scienza è solo uno dei possibili “strumenti di lettura” che con le sue teorie, formule e leggi fornisce una descrizione fenomenica dell'Universo. Ma la Scienza non è una chiave di lettura univoca e non è l'unica possibile; in sostanza, appare evidente che un modo diverso di concepire la Scienza e la Tecnologia può esistere e forse potenzialmente già esiste. Servono, infatti, altre prospettive e non da ultimo quella spirituale e metafisica. Tutte insieme possono convergere verso la ricostruzione dei legami fra Umanità, Natura e Universo perché è in essi che si realizzano le funzioni fondamentali dell'esistenza simbolica, l'unica capace di esprimere il senso proprio dell'Essere e del non-Essere. Grazie alla funzione simbolica è possibile andare oltre la dimensione degli “oggetti” e spingersi all'interno della realtà. Anche la stessa Scienza, forse, potrebbe trarre un enorme vantaggio da tutto questo.

Bibliografia

- Alvino, G. & Leggio, T. (2006) - *Acque e culti salutaris in Sabina. Usus veneratioque fontium*, 17-54.
- Andrisani, A. (2009) - *Il santuario della Dea Mefitis a Rossano di Vaglio. Una rilettura degli aspetti archeologici e culturali*.
- Angeletti L.R., (1995) - *Ambiente ed Istituzioni politiche nella Medicina antica ed in quella contemporanea, Introduzione, Medicina nei Secoli. Arte e Scienza, Giornale di Storia della Medicina*, n.s., 7 (3): 415 - 423.
- Annibaletto M., Bassani M. & Ghedini F. (Eds.) (2015) - *Cura, preghiera e benessere: le stazioni curative termominerali nell'Italia Romana*. In *Atenor Quaderni*, 31, Padova University Press.
- Augé, M. (2002) - *Genio del paganesimo*. Bollati Boringhieri.
- Bassani, M., Bressan, M., & Ghedini, F. (Eds.) (2013) - *Aquae salutaris: il termalismo tra antico e contemporaneo*. Atti del Convegno internazionale "Montegrotto Terme, 6-8 settembre 2012". Padova University Press.
- Bendlin, A. (2000) - *Looking beyond the civic compromise: religious pluralism in late republican Rome*. In: Bispham & Smith, 115- 135.
- Bottin L. (Ed.) (1986) - *Ippocrate, Arie, Acque e luoghi*, Venezia.
- Calisti, F. (2006) - *Mefitis: dalle madri alla madre: un tema religioso italico e la sua interpretazione romana e cristiana*.
- Calisti, F. (2010) - *Sacralità dell'acqua e sacrifici di riscatto*. In: I riti del costruire nelle acque violente, 31-42.
- Cancellieri M., (1995) - *L'acqua come segno di vita: modi e tecniche di utilizzo nel mondo romano alla luce della documentazione archeologica*. Medicina nei secoli. Arte e Scienza, Giornale di storia della medicina, n. s., 7(3): 451-460.
- Chellini, R. (2002) - *Acque sorgive salutaris e sacre in Etruria (Italiae Regio VII)*. BAR International Series 1067, London.
- Coarelli, F. (1998) - *Il culto di Mefitis in Campania e a Roma*. In: I culti della Campania antica, Atti del Convegno Internazionale di Studi in ricordo di Nazarena Valenza Mele. Napoli 15-17 maggio 1995, Roma, 185-90.
- Dumézil, G., & Jesi, F. (1977) - *La religione romana arcaica; con una appendice su La religione degli etruschi*. Rizzoli.

- Edlund, I. (2006) - *Healing, health, and well-being: archaeological evidence for issues of health concerns in ancient Italy*. *Archiv für Religionsgeschichte* 8: 81-88.
- Edlund-Berry, I. (2006) - *Hot, cold, or smelly: the power of sacred water in Roman religion, 400-100 BCE*. *Religion in Republican Italy*, 162-180.
- Eliade, M. (1981) - *Immagini e simboli: saggi sul simbolismo magico - religioso*, Editoriale Jaca Book.
- Gasparini, L. (Ed.), (2006) - *Usus veneratioque fontium - Fruizione e culto delle acque salutaris nell'Italia romana*, Tivoli (Roma).
- Guénon, R., Maserà, T. & Nutrizio, P. (1982) - *Il regno della quantità e i segni dei tempi*, Adelphi.
- Guénon, R., & Zambon, F. (1990) - *Simboli della scienza sacra*, Adelphi.
- Jackson, R. (1990) - *Waters and spas in the classical world*. *Medical History, Supplement* 10, 1.
- Jackson, R. (1999) - *Spas, waters and hydrotherapy in the Roman World*. *Journal of Roman Archaeology Supplementary Series*, 37: 107-116.
- Loffredo, F. (2012) - *La Dea Mefitis: dalle mofite del Sannio ad Abano Terme*. *I Quaderni del Ramo d'Oro*, 5: 176-188.
- Melillo, (1995) - *Il termalismo nell'età antica*. Medicina nei Secoli. Arte e Scienza, Giornale di Storia della Medicina, n. s., 7(3): 461- 484.
- Monti, S., Claval, P., Pagnini, M. P., & Scaini, M. (2006) - *Thermalism between past and future*. In: Part VI, *Tourism, Sustainable Development and Culture Turn*.
- Petraccia, M. F. (2014) - *Mefitis Dea salutaris?/Mefitis goddess that gives health?* *Gerión*, 32: 181-198.
- Rainini, I. (2003) - *Mephitis aedes o locus consaeptus. Alcune osservazioni sul santuario della Dea Mefite nella Valle d'Ansanto*, In : *Sanctuaires et sources dans l'antiquité: Les sources documentaires et leurs limites dans la description des lieux de culte*, O. De Cazanove & J. Scheid Eds., Napoli, 137- 43.
- Rüpke, J. (2006) - *Communicating with the Gods. A Companion to the Roman Republic*, 213-235.
- Valvo, A. (2006) - *Fruizione e culto delle acque salutaris in età romana nel territorio lombardo*. In: Gasparini (Ed.) 2006, 363-384.
- Zolla, E. (2002) - *Discesa all'Ade e resurrezione*. Piccola biblioteca Adelphi, 485.

Terapie termali nel trattamento delle malattie reumatiche: utopia o realtà?

Antonella Fioravanti, Sara Tenti, Sara Cheleschi, Mauro Galeazzi

Dipartimento di Scienze Mediche, Chirurgiche e Neuroscienze, UOC Reumatologia, Azienda Ospedaliera Universitaria Senese, viale Bracci 1, 53100 Siena; fioravanti7@virgilio.it

Introduzione

In Italia le malattie reumatiche (MR) colpiscono circa 5,5 milioni di persone, ovvero un decimo dell'intera popolazione (Ciocci, 1999). Si collocano al secondo posto (12,3%) nella graduatoria di frequenza di tutte le malattie dopo le affezioni dell'apparato respiratorio (41,6%) e al primo fra le malattie "cronico - degenerative". Nella maggioranza dei casi la patologia reumatologica è rappresentata da affezioni croniche, con andamento gradualmente progressivo, che possono non solo coinvolgere l'integrità fisica dell'individuo (sino a condurre ad un'invalidità temporanea o permanente tale da rendere difficili o impossibili le normali attività della vita quotidiana) ma anche avere ripercussioni negative sul piano psicologico. La terapia di queste malattie non può quindi limitarsi al solo trattamento farmacologico, ma deve prevedere un programma piuttosto articolato e basato sul ricorso a presidi terapeutici tra cui figurano gli interventi termali.

I trattamenti termali, di comune impiego già nell'antichità, stanno di nuovo suscitando un notevole interesse e trovano una sempre maggiore applicazione nella programmazione terapeutica di molte affezioni reumatiche ed ortopediche. I motivi di tale successo sono individuabili nel carattere cronico di queste affezioni, nell'uso di farmaci spesso causa di gravi effetti collaterali (soprattutto nel paziente anziano) e nella tipica sintomatologia clinica dominata dal dolore e dall'impotenza funzionale. La loro fortuna è dovuta anche alla tradizione più che millena-

ria ed alla diffusione in molti Paesi Europei, tra cui l'Italia, di stazioni termali efficienti e confortevoli.

Secondo le stime dello studio internazionale Hydroglobe (2016), le richieste di prestazioni termali per MR si collocano al primo posto nel nostro Paese e in altre parti d'Europa. È quindi doveroso chiederci quale sia il reale valore medico-scientifico di queste terapie. A tale scopo esamineremo le più recenti evidenze scientifiche riguardanti l'efficacia clinica, i possibili meccanismi d'azione e il rapporto costo/beneficio delle terapie termali nelle affezioni reumatiche per le quali esiste un'indicazione primaria.

Le regole da seguire per un uso corretto dei mezzi termali

Le cure termali sono in genere indicate nella prevenzione, terapia e riabilitazione di precise patologie osteoarticolari (Fioravanti & Marcolongo, 2000). Tali cure trovano applicazione anche in ambito reumatologico, con l'intuitiva possibilità di allargare le indicazioni e di restringere le controindicazioni se associate ad altre pratiche (farmacologiche, fisiochinesiterapiche, dietoterapiche) in un ben congegnato piano terapeutico, come enfatizzato da alcune linee guida internazionali. Il successo delle pratiche fango-balneo-terapiche è naturalmente subordinato ad una loro accurata conoscenza e ad un corretto procedimento diagnostico. Anche il ricorso ai mezzi crenoterapici non può prescindere da una preliminare ed accurata indagi-

ne clinico-diagnostica per stabilire sia la natura, la fase e la tendenza evolutiva della patologia articolare, sia l'inquadramento globale del paziente. Le cure termali, dunque, si rivelano utili e vantaggiose purché siano rispettati tre principi generali che devono precedere il momento prescrittivo:

- *esattezza della diagnosi.* Sotto il termine generico di MR sono comprese più di 120 malattie ben caratterizzate e classificate: per alcune di esse è indicato il trattamento termale, per altre è ritenuto inutile, per altre ancora controindicato o dannoso. Inviare quindi un paziente agli stabilimenti termali senza una precisa e circostanziata diagnosi, evenienza questa purtroppo frequente, conduce spesso al fallimento terapeutico o ad un aggravamento della patologia reumatica infondendo e diffondendo sfiducia verso il mezzo termale;
- *definizione della fase clinica.* Anche per le MR che possono giovare del trattamento fango-balneo-terapico, esiste una fase termale ovvero una fase della malattia in cui tale terapia può essere attuata senza danno e senza provocare reazioni abnormi. Le cure termali si rivelano utili quando siano rilevabili fasi della malattia con attività torpida, assenza di stati iperalgici, assenza o modesta intensità della componente flogistica, scarsa tendenza all'evoluitività morbosa. Sono dunque le patologie a carattere cronico recidivante e le fasi di cronicizzazione di alcune malattie flogistiche a giovare maggiormente del mezzo fango-balneo-terapico;
- *inquadramento globale del paziente.* La presenza di patologie associate può costituire una controindicazione alle cure termali o condizionare la scelta degli schemi terapeutici (per esempio fangatura parziale e non generale). Alcune affezioni possono essere suscettibili di una correzione attraverso lo stesso mezzo termale (per esempio un dismetabolismo lipidico) o attraverso un adeguato supporto farmacologico e dietoterapico la cui programmazione permetterà di limitare le controindicazioni e di attuare una razionale strategia terapeutica.

Indicazioni alle cure termali in Reumatologia

In base ai dati bibliografici relativi agli studi di base ed alla sperimentazione clinica, il ricorso alle terapie termali appare vantaggioso nelle seguenti patologie di pertinenza reumatologica:

1. Osteoartrosi primitiva e secondaria in tutte le sue localizzazioni (Karagülle *et al.*, 2007; Bálint *et al.*, 2007; Forestier *et al.*, 2010; Fioravanti *et al.*, 2010, 2015; Espejo-Antúnez *et al.*, 2013; Tefner *et al.*, 2013)
2. Reumatismi extra - articolari generalizzati (Fibromialgia primitiva) e localizzati (Periartriti di spalla ed anca, Borsiti, Tendiniti, ecc.) in fase non infiammatoria od iperalgica (Fioravanti *et al.*, 2007; Ozkurt *et al.*, 2012; Bağdath *et al.*, 2015)
3. Lombalgia cronica (Abu-Shakra *et al.*, 2014; Karagülle&Karagülle, 2015; Tamás *et al.*, 2018)
4. Spondiloartriti sieronegative (Artrite psoriasica, Spondilite anchilosante) in fase di stabilizzazione clinica, laboratoristica e strumentale (Sukenik *et al.*, 2001; van Tubergen *et al.*, 2001; Ciprian *et al.*, 2013; Cozzi *et al.*, 2015)
5. Artrite reumatoide solo in fase di stabilizzazione clinica, laboratoristica e strumentale e soprattutto a scopo riabilitativo (Sukenik *et al.*, 1995; Karagülle *et al.*, 2018).

Come sostenuto da molteplici meta-analisi, revisioni sistematiche e studi clinici randomizzati controllati nelle patologie sopraelencate, la crenoterapia esterna ha significativi effetti sulla sintomatologia algica, funzionale e sulla qualità di vita (Guidelli *et al.*, 2012; Tenti *et al.*, 2015; Forestier *et al.*, 2016; Matsumoto *et al.*, 2017). Da rilevare è la cronologia dell'effetto terapeutico, caratterizzata da una fase immediata e da una tardiva. La prima, subito al termine della cura, consiste in una parziale risoluzione della sintomatologia ed è legata all'effetto analgesico e decontratturante del mezzo termale; essa non è sempre presente in quanto il paziente può lamentare nell'immediato una recrudescenza del quadro clinico. La seconda è osservabile più tardi, fino a 3-6 mesi (effetto a medio e a lungo termine) dall'interruzione del trattamen-

to (Forestier *et al.*, 2010; Espejo-Antúnez *et al.*, 2013; Fioravanti *et al.*, 2007, 2014, 2015). Questa evidenza costituisce un aspetto peculiare del mezzo di cura termale, che mantiene la sua efficacia nel tempo in termini di attività analgesica e miglioramento delle *performance* funzionali, così come dimostrano diversi studi *long-term* soprattutto nella patologia artrosica, nella fibromialgia e nel *low-back pain* (Forestier *et al.*, 2010; Espejo-Antúnez *et al.*, 2013; Fioravanti *et al.*, 2007, 2014, 2015; Nguyen *et al.*, 1997). L'efficacia terapeutica a lungo termine può essere spiegata sulla base delle attività del mezzo crenoterapico sui mediatori che determinano la flogosi ed il danno cartilagineo caratterizzanti le varie MR.

Meccanismi d'azione delle terapie termali nelle malattie reumatiche: quali evidenze scientifiche?

I meccanismi d'azione dei mezzi di cura termali sono probabilmente ascrivibili ad una serie di effetti combinati di tipo meccanico, fisico, chimico e fisico-chimico (Fioravanti *et al.*, 2011). Tali meccanismi possono essere distinti in aspecifici (idroterapici in senso lato), comuni ai semplici bagni in acqua potabile calda, e specifici (idrominerali e crenoterapici), dipendenti dalle caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua impiegata. Mentre i primi sono ben conosciuti, i secondi sono difficilmente identificabili e valutabili (Fioravanti *et al.*, 2011).

Gli stimoli aspecifici meccanici e termici agiscono favorevolmente sul tono muscolare, sulla sintomatologia dolorosa e, conseguentemente, sulle capacità funzionali articolari. La pressione e la temperatura dell'acqua, a contatto della cute, inducono un effetto analgesico in accordo alla "gate theory" di Melzack (Melzack & Wall, 1965). L'alta temperatura del fango e delle acque minerali provoca, inoltre, una rapida iperemia di superficie con iniziale decongestione profonda, seguita da un'iperemia attiva dei tessuti, tra cui quelli peri-articolari (capsule, legamenti). Le conseguenze più importanti dell'iperemia e dell'aumento della velocità del circolo sono rappresentate dall'allontanamento dei mediatori flogistici e nocicettivi, nonché dalla riduzione dell'ipertono muscolare e dell'imbibizione dei tessuti peri-articolari (Lehmann & Lateur, 1994). Tra le azioni benefiche del calore è da includere l'aumentata estensibilità dei tessuti ricchi di collagene, come i tendini, le fasce e le capsule articolari, la quale può spiegare il più ampio *range* di escursione articolare indotto dalla fango-balneo-terapia a livello delle articolazioni colpite dai processi patologici (Fioravanti *et al.*, 2011). Gli effetti descritti consentono di interrompere il circolo vizioso dolore - contrattura muscolare - alterata dinamica articolare - dolore che caratterizza molte artropatie croniche (Fig.1). La riduzione del tono muscolare e il miglior utilizzo delle articolazioni rappresentano alcuni tra i più importanti elementi per spiegare gli effetti benefici a medio e lungo termine documentati in vari studi clinici.



Fig. 1. Gli stimoli meccanici e termici e la riduzione dei livelli plasmatici di beta-endorfina agiscono favorevolmente sul tono muscolare e sulla sintomatologia dolorosa, interrompendo il circolo vizioso dolore - contrattura muscolare - dolore caratteristico di molte affezioni di origine reumatica, ortopedica e traumatica. FBT: fango-balneo-terapia.

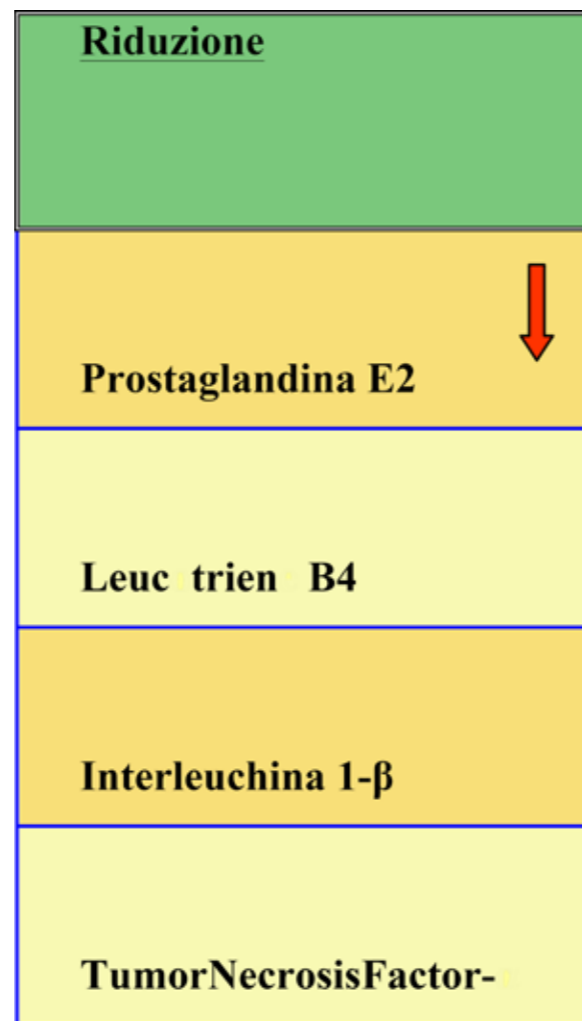
ATTIVAZIONE DI REAZIONI NEUROENDOCRINE

Lo stress termico determina l'attivazione di una serie di reazioni neuro-endocrine. In particolare, l'aumento del calore stimola la liberazione di ACTH e di cortisolo, di prolattina e di GH, pur non modificando il ritmo circadiano di questi ormoni (Crielaard *et al.*, 1985; Kuczera & Kokot, 1996). L'effetto dello stress calorico sull'asse ipotalamo - ipofisi-surrene appare di particolare importanza per le azioni antiedemigene ed antiflogistiche dei corticosteroidi, nonché per la frequente alterazione di tale asse nel corso di alcune affezioni reumatiche (Gur *et al.*, 2004). L'aumento della beta-endorfina, dimostrato con varie tecniche termoterapiche (Laatikainen *et al.*, 1988; Vescovi *et al.*, 1990; Kubota *et al.*, 1992; Cozzi *et al.*, 1995; Bellometti & Galzigna, 1999), è responsabile dell'effetto analgesico e miorelaxante ed assume rilevanza nei pazienti in cui il sintomo dolore è dominante. In proposito, è stato evidenziato che l'applicazione del fango termale maturo in soggetti sani induce un rapido incremento della beta-endorfina plasmatica i cui valori tornano ai livelli iniziali entro il periodo della cosiddetta reazione termale (Cozzi *et al.*, 1995). L'aumento della beta-endorfina rappresenta probabilmente il fattore maggiormente coinvolto nel meccanismo di tollerabilità individuale all'applicazione del fango termale.

Dati recenti hanno mostrato come, a seguito di stimoli differenti (raggi ultravioletti, stimoli termici, lipopolisaccaridi), cheratinociti normali possono produrre pro-opio-melanocortina, la quale rappresenta il precursore delle endorfine (Ghersetich *et al.*, 2000). Questo risultato permette di formulare l'affascinante ipotesi che sia possibile condizionare la produzione di peptidi oppioidi da parte della cute, modificando così la personale sfera emotiva o la soglia di reazione a stimoli dolorifici. Se a tali evidenze aggiungiamo che i peptidi oppioidi sono dotati anche di effetti immuno- modulatori (Berczi *et al.*, 1996) prende sempre maggiore forza l'ipotesi di strette relazioni tra terapie termali e sistema psico-neuro-immunologico.

EFFETTI SU MEDIATORI DELLA FLOGOSI E DELLA CONDROLISI

Studi recenti hanno evidenziato, in pazienti affetti da osteoartrosi o fibromialgia e sottoposti a balneo o fango-terapia, una riduzione dei livelli circolanti della Prostaglandina E2 (PGE2) e del Leucotriene B4 (LTB4) che sono importanti mediatori della flogosi e del dolore (Tab.I) (Bellometti



Tab. I. Effetti della fango-balneo-terapia su mediatori della flogosi e della condrolisi.

Ricerche *in vitro* ed *in vivo* hanno dimostrato un effetto positivo delle acque minerali sul sistema ossidante/antiossidante e sull'Ossido Nitrico (NO) (Farrell *et al.*, 1992; Mazzetti *et al.*, 2001). L'incubazione con acque minerali sulfuree di leucociti polimorfonucleati neutrofilari variamente attivati, inibisce il release delle specie reattive dell'ossigeno (ROS) e dell'azoto (RNS) (Braga *et al.*, 2008). Vari studi hanno evidenziato un'azione positiva della fango-balneo-terapia, in particolare quella sulfurea, sul sistema ossidante/antiossidante (Fig.2) (Eckmekcioglu *et al.*, 2002; Grabski *et al.*, 2004; Bender *et al.*, 2007).

& Galzigna, 1998; Ardiç *et al.*, 2007). Il mezzo crenoterapico interviene anche sulla sintesi di diverse citochine implicate nella flogosi e nella condrolisi in corso di MR; dopo un ciclo di fanghi e bagni termali è infatti dimostrabile nell'uomo una riduzione delle citochine Interleuchina-1β (IL-1β) e Tumor Necrosis Factor-α (TNF-α) e dei recettori solubili di quest'ultimo (Tab.I) (Ardiç *et al.*, 2007; Cecchetti *et al.*, 1995; Bellometti *et al.*, 1997, 2002). Cicli di fango-balneo-terapia determinano inoltre un incremento di alcuni fattori di crescita, quali l'*Insulin Growth Factor 1* (IGF1) (Bellometti *et al.*, 1997) che stimola il metabolismo cartilagineo. In pazienti con spondilite anchilosante è stato evidenziato invece un aumento del *Transforming Growth Factor-β* (TGF-β), potente citochina ad attività antiflogistica (Tab. I) (Shehata *et al.*, 2006).

Tra i fattori responsabili dei fenomeni infiammatori e degenerativi cartilaginei nelle affezioni reumatiche devono essere considerate le adipochine secrete dal tessuto adiposo bianco, il quale rappresenta un organo endocrino adibito a secerne molteplici fattori biologicamente attivi, complessivamente denominati "adipocitochine". Queste ultime comprendono: le adipochine (adiponectina, leptina, visfatina, resistina, chemerina, omentina, ecc.), le citochine, le chemochine e i fattori del complemento. Le adipochine sono prodotte principalmente dagli adipociti ma, in determinate condizioni, possono essere rilasciate da altri tipi cellulari, quali i miociti, i fibroblasti ed i

macrofagi (Neumann *et al.*, 2016). I prodotti biologici del tessuto adiposo svolgono un ruolo rilevante in numerosi processi fisiologici e patologici, inclusi l'infiammazione, il metabolismo lipidico e glucidico, il metabolismo osseo e cartilagineo e contribuiscono allo stato cronico d'infiammazione sistemica associato all'obesità. Le adipochine, in particolare la leptina, la adiponectina, la visfatina e la resistina, sono inoltre considerate fattori chiave nella fisiopatologia dell'artrosi (Conde *et al.*, 2011; Hu & Bao, 2011). Recenti risultati hanno evidenziato la capacità del mezzo di cura termale di modulare la produzione di adipochine in pazienti affetti da artrosi del ginocchio con effetto complessivamente condroprotettivo (Fioravanti *et al.*, 2011, 2015).

EFFETTI SUL SISTEMA IMMUNITARIO

Lo stress termico possiede un effetto complessivamente immunosoppressivo. In volontari sani trattati con bagni ipertermali è stata osservata una significativa ed alta riduzione dei livelli circolanti dei T-linfociti (Fioravanti *et al.*, 2011). La T linfocitopenia e la eosinopenia, determinate dall'ipertermia, possono essere il risultato di una redistribuzione delle cellule indotta probabilmente dall'aumento dell'ACTH e del cortisolo provocato dallo stress calorico.

Studi *in vitro* hanno dimostrato un effetto inibitorio dose-dipendente delle acque termali di tipo sulfureo sulla blastizzazione e proliferazione dei linfociti T ottenuti dal sangue periferico, sia di soggetti normali che affetti da patologie infiammatorie croniche (Valiutti *et al.*, 1990). D'altra parte l'immersione in acqua termale, alla temperatura di 40°C, riduce la risposta linfocitaria alla fitoemoagglutinina (Smith *et al.*, 1978). Le acque termali sulfuree sembrano esercitare inoltre una potente azione inibitoria sulla produzione delle citochine, in particolare dell'interleuchina-2 (IL-2) e dell'interferone gamma (IFN-γ). Poiché tali citochine sono prodotte principalmente dai linfociti CD4+, si ipotizza che il *target* principale delle acque ricche di zolfo siano le cellule *T-memory*.



Fig. 2. Per la spiegazione si veda nel testo

Queste, inibite nella loro capacità di proliferazione e di produzione di citochine, come conseguenza all'applicazione delle acque ricche di zolfo determinerebbero una modulazione delle risposte immunitarie (Ghersetic & Lotti, 1996).

L'ipertermia ha inoltre importanti effetti sui granulociti; il calore, infatti, aumenta la mobilità e l'attività fagocitaria, le proprietà battericide e l'attività enzimatica granulocitaria (Fioravanti *et al.*, 2011).

EFFETTI EPIGENETICI: MODIFICAZIONE DI MICRORNACIRCOLANTI

I microRNA (miRNA) sono piccole molecole di RNA non codificante, lunghe circa 22 nucleotidi, in grado di regolare negativamente la traduzione e la stabilità di centinaia di miRNA e quindi di modulare l'espressione genica. Ad oggi sono stati identificati più di 1600 miRNA, coinvolti nella patogenesi di numerose malattie, tra cui l'osteoartrosi (Diaz-Prado *et al.*, 2012; De Palma *et al.*, 2017). Una recente ed innovativa scoperta ha evidenziato che la fango-balneo-terapia può regolare i livelli circolanti di alcuni miRNA considerati chiave nella fisiopatologia dell'artrosi (Giannitti *et al.*, 2017). Per la precisione, un ciclo di fango-balneo-terapia in paziente con artrosi del ginocchio riduce i livelli di espressione dei miR-155, miR-223 e miR-146, considerati tra i più importanti nella regolazione del metabolismo cartilagineo (Diaz-Prado *et al.*, 2012; De Palma *et al.*, 2017). Tale effetto è ascrivibile probabilmente all'azione combinata del calore e della pressione idrostatica (Imbeault *et al.*, 2009; Iwen *et al.*, 2011; Potla *et al.*, 2015; Cheleschi *et al.*, 2017).

EFFETTI SU FATTORI DI RISCHIO CARDIOVASCOLARE

Le segnalazioni relative all'attività normolipidizzante, esercitata in particolare dalla fango-balneo-terapia con acque sulfuree, risalgono ormai ad alcuni decenni. I risultati di queste ricerche documentano sia la diminuzione del colesterolo totale, dei trigliceridi e del colesterolo non esterifi-

ficato, sia un aumento non trascurabile del colesterolo-HDL (Tab.II) (Mizoguchi, 1970; De Gregorio *et al.*, 1986). Più recentemente l'attenzione è stata focalizzata sull'omocisteina plasmatica, un fattore di rischio associato a malattia coronarica, insufficienza cardiaca, ipertensione arteriosa, eventi trombotici (Bostom & Selhub, 1999; Ozkan *et al.*, 2002; Vasan *et al.*, 2003); in pazienti osteoartrosici, trattati con un ciclo di balneo-terapia in acqua sulfurea (Tab.II) (Leibetseder *et al.*, 2004), è stata notata una riduzione di tale fattore. Qualora si consideri la chiara associazione di diverse MR con i processi aterosclerotici (Turesson *et al.*, 2008; Nurmohamed, 2009), il decremento del rischio cardiovascolare dovuto all'uso della fango-balneo-terapia assume un notevole interesse.

EFFETTI SU MODELLI SPERIMENTALI

Un effetto antiflogistico dell'applicazione fango-balneo-terapia, con acque appartenenti al gruppo delle salse, è stato recentemente provato da Cozzi *et al.* (2004) nell'artrite da adiuvante di Freund nel ratto. La riduzione dell'edema nella zampa, misurata tramite pletismometria dopo l'applicazione crenoterapica, è accompagnata da un abbassamento significativo dei livelli circolanti di TNF- α e IL-1 β , che rappresentano le due citochine più importanti nella mediazione del danno flogistico e della condrolisi in varie affezioni reumatiche. Britschka *et al.* (2007) hanno confermato gli effetti antiflogistici e condroprotettivi dell'applicazione di fanghi nell'artrite (indotta tramite iniezione intra-articolare di Zymosan) del ratto attraverso un'analisi istologica dei tessuti sinoviale e cartilagineo prelevati negli animali sacrificati al 21° giorno del trattamento. Più in particolare, l'esame del tessuto sinoviale ha evidenziato una ridotta iperplasia del *lining*, della vascolarizzazione e dell'infiltrazione cellulare nel gruppo di ratti trattato con fango-terapia rispetto a quello trattato con semplice acqua potabile riscaldata e a quello privo di qualsiasi trattamento (controllo). A livello cartilagineo sono stati macroscopicamente dimostrati una riduzione delle lesioni erosive e un

Riduzione	Incremento
Colesterolo totale ↓	Colesterolo HDL (in pz dislipidemicici) ↑
Trigliceridi	
Omocisteina sierica	

Tab. II. Effetti della fango-balneo-terapia su fattori di rischio cardiovascolare.

aumento della densità condrocitaria, del contenuto di collagene e dei proteoglicani.

Il possibile effetto condroprotettivo delle acque minerali termali è confermato da alcune ricerche pilota *in vitro* su colture di condrociti. Burguera *et al.* (2014) hanno evidenziato un'azione antinfiammatoria e antiossidante da parte di donatori di H₂S su condrociti osteoartrosici umani stimolati con IL-1 β . In un recente lavoro Fioravanti *et al.* (2013) hanno conseguito risultati simili incubando condrociti umani con acqua di Vetriolo fortemente mineralizzata e ad alto contenuto di ferro.

EFFETTI DELL'AMBIENTE TERMALE

Nell'ambito dei meccanismi d'azione della fango-balneo-terapia nelle MR, assumono importanza anche elementi quali le condizioni climatiche ed ambientali delle stazioni termali, il maggior tempo dedicato al riposo e l'allontanamento dallo *stress* quo-

tidiano (Fioravanti *et al.*, 2011; Bender *et al.*, 2005). Il riposo (*bed rest* degli autori anglosassoni), ad esempio, rappresenta di per sé una terapia per l'artrite reumatoide (AR) poiché determina una riduzione dell'attività clinica della malattia (Smith, 1980).

Qual è il rapporto costo/efficacia delle terapie termali?

Poche valutazioni di farmaco-economia sono state condotte sulle terapie termali in generale ed ancora meno su quelle relative alle malattie reumatiche (Fioravanti *et al.*, 2003; van Tubergen *et al.*, 2002; Zijlstra *et al.*, 2007). In un recente studio della dr.ssa Fioravanti, in collaborazione con l'Università Bocconi di Milano, è stato pubblicato il primo report prospettico randomizzato controllato sulla valutazione sia dei costi sanitari diretti, sia del rapporto costo/efficacia della fango-balneo-te-

rapia nell'artrosi del ginocchio (Ciani *et al.*, 2017). Lo studio ha previsto un confronto, in un periodo di *follow-up* di un anno, tra un gruppo di pazienti trattati con fango-balneo-terapia (presso le Terme di Chianciano in Provincia di Siena) in aggiunta alle terapie convenzionali e un gruppo limitato unicamente a queste ultime. I costi sanitari (spese sostenute per consumo di farmaci, visite mediche, eventuali ospedalizzazioni, terapie fisiche, riabilitative, ecc.) sono stati desunti dai dati riportati nel diario del paziente al momento della visita iniziale e aggiornati ad ogni visita di controllo. La loro analisi ha evidenziato per il primo gruppo un costo medio totale per paziente molto più basso (302 euro, comprensivi dei 134 euro per il trattamento termale) rispetto al secondo (975 euro), con un risparmio di 672 euro. La differenza è da imputarsi alle spese legate all'ospedalizzazione di 6 pazienti per protesizzazione, al comune ricorso ad infiltrazioni di acido ialuronico, al maggior uso di farmaci sintomatici (per via generale o locale) e condroprotettori, alla diffusa richiesta di visite specialistiche e *test* di laboratorio. La valutazione costo/efficacia è stata eseguita tramite il QALY (*Quality-Adjusted Life Years*), una delle metodologie più note e impiegate in ambito economico relativo agli interventi sanitari. Il QALY combina insieme la durata della vita con la qualità della vita stessa: un QALY pari ad 1 corrisponde all'aspettativa di un anno in condizioni di buona salute, un QALY pari a 0 corrisponde alla morte (Ciani *et al.*, 2017). Anche in termini di QALY la differenza tra i due gruppi è netta e a favore di quello trattato con fango-balneo-terapia.

Problemi aperti sull'utilizzo delle cure termali

Sebbene i dati presentati risultino stimolanti, non è possibile ignorare l'esistenza di una serie di dubbi ed incertezze che ancora non consentono di ottenere sulle terapie termali un completo consenso dal mondo scientifico (Verhagen *et al.*, 2007). Uno dei punti critici è rappresentato dal controverso problema dell'assorbimento dei mi-

nerali disciolti nelle acque, ovvero dalla dimostrazione di effetti specifici oltretutto aspecifici legati alla semplice azione del calore. In via teorica non si può escludere che le componenti dell'acqua minerale o del fango, presenti talora in tracce, possano essere assorbiti attraverso la cute ed agire poi a livello sistemico. Ciò appare tanto più probabile qualora si consideri che negli studi controllati con un'acqua o un fango placebo non sono state evidenziate le stesse modificazioni indotte dal mezzo termale, escludendo quindi che tali effetti siano dovuti semplicemente all'azione termica. Analogamente è stato mostrato come l'applicazione diretta dei fanghi sulla cute conduca ad effetti clinici maggiori rispetto all'applicazione di fanghi effettuata con pellicole di nylon (Odabasi *et al.*, 2008). Seppure non numerosi, studi sperimentali hanno poi ribadito il possibile assorbimento cutaneo degli elementi presenti nelle acque minerali tramite applicazioni crenoterapiche esterne.

Shani *et al.* (1985) hanno documentato un significativo incremento nella concentrazione sierica di bromo, rubidio, calcio e zinco in pazienti con artrite psoriasica sottoposti a bagni nel Mar Morto. Per questi autori la penetrazione dei soluti è presumibilmente influenzata dalla durata dell'immersione, dalla temperatura dell'acqua, dalla sua composizione e da meno conosciuti altri fattori.

Rimane da chiarire quali siano le acque minerali più indicate per le diverse patologie e, quindi, se esiste una specificità di azione dei vari componenti. Fra l'altro, un risultato positivo in questo senso porterebbe le stazioni termali ad indirizzare in maniera più corretta e razionale i propri interventi terapeutici.

Fra i vari effetti evidenziati in precedenza ci sono anche quelli della fango-balneo-terapia su mediatori della flogosi e della condrolisi; le modificazioni indotte si riferiscono però solo al breve termine, ovvero alla fine del ciclo terapeutico, mentre nulla è conosciuto sul loro comportamento a distanza di tempo. Questo è un elemento chiave per cercare di spiegare la persistenza del beneficio sintomatico dovuto alla terapia, come indicato dagli studi clinici controllati a lungo termine.

Seppure importanti, i risultati acquisiti sono dunque da considerarsi iniziali ed aspettano conferme approfondite condotte secondo i canoni della moderna ricerca scientifica. Il termalismo non può più sottrarsi alle verifiche volte a fornire indicazioni terapeutiche sempre più precise, a chiarire i meccanismi di azione

e gli effetti legati all'applicazione effettuata. Soltanto così la Medicina Termale potrà uscire dallo stretto ambito delle cosiddette terapie alternative e non essere più considerata un semplice placebo o l'ultimo rimedio cui ricorrere quando tutti gli altri mezzi di cura tradizionali hanno fallito.

Bibliografia

- Abu-Shakra M., Mayer A., Friger M. *et al.* (2014) - *Dead Sea mud packs for chronic low back pain*. Isr. Med. Assoc. J., 16: 574-7.
- Ardiç F., Özgen M., Aybek H. *et al.* (2007) - *Effect of balneotherapy on serum IL-1, PGE2 and LTb4 levels in fibromyalgia patients*. Rheumatol. Int., 27: 441-446.
- Bağdatlı A.O., Donmez A., Eröksüz R. *et al.* (2015) - *Does addition of "mud-pack and hot pool treatment" to patient education make a difference in fibromyalgia patients? A randomized controlled single blind study*. Int. J. Biometeorol., 59: 1905-1911.
- Bellometti S., Cecchetti M. & Galzigna L. (1997) - *Mud-pack therapy in osteoarthritis changes levels of chondrocytes markers*. Clin. Chim. Acta, 268: 101-106.
- Bellometti S. & Galzigna L. (1998) - *Serum levels of a prostaglandin and a leukotriene after termalmud-pack therapy*. J. Invest. Med., 46: 140-145.
- Bellometti S., Galzigna L., Richelmi P. *et al.* (2002) - *Both serum receptors of tumor necrosis factor are influenced by mud pack treatment in osteoarthrotic patients*. Int. J. Tissue React., 24: 57-64.
- Bender T., Bariska J., Vághy R. *et al.* (2007) - *Effect of balneotherapy on the Antioxidant System - A controlled pilot study*. Arch. Med. Res., 38: 86-89.
- Berczi I., Chalmers I. M., Nagy E. *et al.* (1996) - *The immune effects of neuropeptides*. Baillieres Clin. Rheumatol., 10: 227-257.
- Bostom A.G. & Selhub J. (1999) - *Homocysteine and arteriosclerosis: subclinical and clinical disease association*. Circulation, 99: 2361-2363.
- Braga P.C., Sambataro G., Dal Sasso M. *et al.* (2008) - *Antioxidant effect of sulphurous thermal water on human neutrophil bursts: chemiluminescence evaluation*. Respiration, 75: 193-201.
- Britschka Z.M.N., Teodoro W.R., Velosa A.P.P. *et al.* (2007) - *Effect of Brazilian black mud treatment in chronic experimental arthritis*. Rheumatol. Int., 28: 39-45.
- Burguera E.F., Vela-Anero A., Magalhães J. *et al.* (2014) - *Effect of hydrogen sulfide sources on inflammation and catabolic markers on interleukin 1β-stimulated human articular chondrocytes*. Osteoarthritis Cartilage., 22: 1026-1035.
- Cecchetti M., Bellometti S., Lalli A. *et al.* (1995) - *Serum interleukin 1 changes in arthrotic patients after mud-pack treatment*. Phys. Rheab. Kur. Med., 5: 92-93.

Cheleschi S., De Palma A., Pecorelli A. *et al.* (2017) - *Hydrostatic Pressure Regulates MicroRNA Expression Levels in Osteoarthritic Chondrocyte Cultures via the Wnt/β-Catenin Pathway*. Int. J. Mol. Sci., 18: E133.

Ciani O., Pascarelli N.A., Giannitti C. *et al.* (2017) - *Mud-Bath Therapy in Addition to Usual Care in Bilateral Knee Osteoarthritis: An Economic Evaluation Alongside a Randomized Controlled Trial*. Arthritis Care Res. (Hoboken), 69: 966-972.

Ciucci A. (1999) - *Aspetti epidemiologici e socio-economici delle malattie reumatiche in Italia*. Reumatismo, 51(2): 405-410.

Ciprian L., Lo Nigro A., Rizzo M. *et al.* (2013) - *The effects of combined spa therapy and rehabilitation on patients with ankylosing spondylitis being treated with TNF inhibitors*. Rheumatol. Int., 33: 241-245.

Conde J., Scotece M., Gómez R. *et al.* (2011) - *Adipokines and osteoarthritis: novel molecules involved in the pathogenesis and progression of disease*. Arthritis, 203901.

Cozzi F., Carrara M., Sfriso P. *et al.* (2004) - *Anti-inflammatory effect of mud-bath applications on adjuvant arthritis in rats*. Clin. Exp. Rheumatol., 22: 763-766.

Cozzi F., Lazzarin I., Todesco S. *et al.* (1995) - *Hypothalamic-pituitary-adrenal axis dysregulation in healthy subjects undergoing mud-bath-applications*. Arthritis Rheum., 38: 724-725.

Cozzi F., Raffener B., Beltrame V. *et al.* (2015) - *Effects of mud-bath therapy in psoriatic arthritis patients treated with TNF inhibitors. Clinical evaluation and assessment of synovial inflammation by contrast-enhanced ultrasound (CEUS)*. Joint Bone Spine, 82: 104-108.

Crielaard J.M., Lorea V., Reuter M. *et al.* (1985) - *Baths and their impact on the hypothalamo-hypophyseal axis*. Acta Belg. Med. Phys., 8: 95-99.

De Gregorio G., Restivo S. & De Gregorio C. (1986) - *Analisi delle modificazioni lipidiche da fangoterapia sulfureo-salzo-bromo-iodica*. Clin. Term., 39: 3-5.

De Palma A., Cheleschi S., Pascarelli N.A. *et al.* (2017) - *Do MicroRNAs have a key epigenetic role in osteoarthritis and in mechanotransduction?* Clin. Exp. Rheumatol., 35: 518-526.

Díaz-Prado S., Cicione C., Muiños-López E. *et al.* (2012) - *Characterization of microRNA expression profiles in normal and osteoarthritic human chondrocytes*. BMC Musculoskelet. Disord., 13: 144.

- Eckmekcioglu C., Strauss-Blasche G., Holzer F. *et al.* (2002) - *Effect of sulfur baths on antioxidative defense systems, peroxide concentrations and lipid levels in patients with degenerative osteoarthritis.* ForschKomplementarmedKlassNaturheilkd., 9: 216-220.
- Farrell A.J., Blake D.R., Palmer R.M. *et al.* (1992) - *Increased concentrations of nitrite in synovial fluid and serum samples suggest increased nitric oxide synthesis in rheumatic diseases.* Ann. Rheum Dis., 51: 1219-1222.
- Fioravanti A., Bacaro G., Giannitti C. *et al.* (2015) - *One-year follow-up of mud-bath therapy in patients with bilateral knee osteoarthritis: a randomized, single-blind controlled trial.* Int. J. Biometeorol., 59: 1333-1343.
- Fioravanti A., Cantarini L., Bacarelli M.R. *et al.* (2011) - *Effects of spa therapy on serum leptin and adiponectin levels in patients with knee osteoarthritis.* Rheumatol. Int., 31: 879-882.
- Fioravanti A., Cantarini L., Guidelli G.M. *et al.* (2011) - *Mechanisms of action of spa therapies in rheumatic diseases: what scientific evidence is there?* Rheumatol. Int., 31: 1-8.
- Fioravanti A., Giannitti C., Chelieschi S. *et al.* (2015) - *Circulating levels of adiponectin, resistin, and visfatin after mud-bath therapy in patients with bilateral knee osteoarthritis.* Int. J. Biometeorol., 59: 1691-1700.
- Fioravanti A., Iacoponi F., Bellisai B. *et al.* (2010) - *Short and long-term effects of spa therapy in knee osteoarthritis.* Am. J. Phys. Med. Reha., 89: 125-132.
- Fioravanti A., Lamboglia A., Pascarelli N.A. *et al.* (2013) - *Thermal water of Vetricolo, Trentino, inhibits the negative effect of interleukin-1 β on nitric oxide production and apoptosis in human osteoarthritic chondrocyte.* Biol. Regul. Homeost. Agents, 27: 891-902.
- Fioravanti A. & Marcolongo R. (2000) - *Principali indicazioni alla crenoterapia. Malattie Reumatiche.* In: Agostini G. (ed.), Manuale di Medicina Termale, 2° ed., 81-94, Archimedita, Torino.
- Fioravanti A., Perpignano G., Tirri G. *et al.* (2007) - *Effects of mud-bath treatment on fibromyalgia patients: a randomized clinical trial.* Rheumatol. Int., 27: 1157-1161.
- Fioravanti A., Tenti S., Giannitti C. *et al.* (2014) - *Short- and long-term effects of mud-bath treatment on hand osteoarthritis: a randomized clinical trial.* Int. J. Biometeorol., 58: 79-86.
- Fioravanti A., Valenti M., Altobelli E. *et al.* (2003) - *Clinical efficacy and cost-effectiveness evidence of spa therapy in osteoarthritis. The results of "Naiade" Italian Project.* Panminerva Med., 45: 211-217.
- Forestier R., Desfour H., Tessier J.M. *et al.* (2010) - *Spa therapy in the treatment of knee osteoarthritis: a large randomized multicentre trial.* Ann. Rheum. Dis., 69: 660-665.
- Forestier R., ErolForestier F.B. & Francon A. (2016) - *Spa therapy and knee osteoarthritis: A systematic review.* Ann. Phys. Rehabil. Med., 59: 216-226.
- Ghersetic I. & Lotti T. (1996) - *Immunologic aspects: immunology of mineral waters.* Clin. Dermatol., 14: 563-566.
- Ghersetic I., Freedman D. & Lotti T. (2000) - *Balneology today.* J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol., 14: 346-348.
- Giannitti C., De Palma A., Pascarelli N.A. *et al.* (2017) - *Can balneotherapy modify microRNA expression levels in osteoarthritis? A comparative study in patients with knee osteoarthritis.* Int. J. Biometeorol., 61: 2153-2158.
- Grabski M., Wozakowska-Kaplon B. & Kedziora J. (2004) - *Hydrogen sulfide water balneum effect on erythrocyte superoxide dismutase activity in patients with rheumatoid arthritis - in vitro study.* Przegł. Lek., 61: 1405-1409.
- Guidelli G.M., Tenti S., De Nobili E. *et al.* (2012) - *Fibromyalgia Syndrome and Spa therapy: myth or reality?* Clin. Med. Insights. Arthritis Musculoskel. Disord., 5: 19-26.
- Gur A., Cevik R., Sarac A.J. *et al.* (2004) - *Hypothalamic-pituitary-gonadal axis and cortisol in young women with primary fibromyalgia: the potential roles of depression, fatigue, and sleep disturbance in the occurrence of hypocortisolism.* Ann. Rheum. Dis., 63: 1504-1506.
- Hu P.F., Bao J.P. & Wu L.D. (2011) - *The emerging role of adipokines in osteoarthritis: a narrative review.* Mol. Biol. Rep., 38: 873-878.
- HydroGlobe (2016) - *Definition of a global framework for hydrotherapy* (A FEMTEC-FoRST joint project with the cooperation of ISMH and the technical support of WHO). <http://www.femteconline.org/hydroglobe/hydroglobe.pdf>.
- Imbeault P., Dépault I. & Haman F. (2009) - *Cold exposure increases adiponectin levels in men.* Metabolism, 58: 552-559.
- Iwen K.A., Wenzel E.T., Ott V. *et al.* (2011) - *Cold-induced alteration of adipokine profile in humans.* Metabolism, 60: 430-437.
- Karagülle M., Karagülle M.Z., Karagülle O. *et al.* (2007) - *A 10-day course of SPA therapy is beneficial for people with severe knee osteoarthritis. A 24-week randomised, controlled pilot study.* Clin. Rheumatol., 26: 2063-2071.
- Karagülle M. & Karagülle M.Z. (2015) - *Effectiveness of balneotherapy and spa therapy for the treatment of chronic low back pain: a review on latest evidence.* Clin. Rheumatol., 34: 207-214.
- Karagülle M., Kardeş S. & Karagülle M.Z. (2018) - *Long-term efficacy of spa therapy in patients with rheumatoid arthritis.* Rheumatol. Int. [Epubahead of print].
- Kubota K., Kukabayashi H., Tamura K. *et al.* (1992) - *A transient rise in plasma b-endorphin after a traditional 47°C hot-spring bath in Kusatsu-spa, Japan.* Life Sci., 51: 1877-1901.
- Kuczera M. & Kokot F. (1996) - *The influence of SPA therapy on endocrine system. Stress reaction hormones.* Pol. Arch. Med. Wewn., 95: 11-20.
- Laatikainen T., Salminen K., Kohvakka A. *et al.* (1988) - *Response of plasma endorphins, prolactin and catecholamines in women to intense heat in a sauna.* Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 57: 98-102.
- Lehmann J. & Lateur B. (1994) - *Ultrasound, shortwave, microwave, laser, superficial heat and cold in the treatment of pain.* In: Wall P. & Melzack R. (eds.), Textbook of pain. 1237-1246. Churchill Livingstone, London.
- Leibetseder V., Strauss-Blasche G., Holzer F. *et al.* (2004) - *Improving homocysteine levels through balneotherapy: effects of sulphur baths.* Clin. Chim. Acta, 343: 105-111.
- Matsumoto H., Hagino H., Hayashi K. *et al.* (2017) - *The effect of balneotherapy on pain relief, stiffness, and physical function in patients with osteoarthritis of the knee: a meta-analysis.* Clin. Rheumatol., 36: 1839-1847.
- Mazzetti I., Grigolo B., Pulsatelli L. *et al.* (2001) - *Differential roles of nitric oxide and oxygen radicals in chondrocytes affected by osteoarthritis and rheumatoid arthritis.* Clin. Science, 101: 593-599.
- Melzack R. & Wall P.D. (1965) - *Pain mechanism: a new theory.* Science, 150: 971-979.
- Mizoguchi T. (1970) - *Effects of thermal spring bath on lipids in serum.* Med. Balneol. Climat., 33: 115-120.
- Neumann E., Junker S., Schett G. *et al.* (2016) - *Adipokines in bone disease.* Nat. Rev. Rheumatol., 12: 296-302.
- Nguyen M., Revel M. & Dougados M. (1997) - *Prolonged effects of 3 weeks therapy in a Spa resort on lumbar spine, knee and hip osteoarthritis: follow up after 6 months. A randomized controlled trial.* Br. J. Rheumatol., 36: 77-81.
- Nurmohamed M.T. (2009) - *Cardiovascular risk in rheumatoid arthritis.* Autoimmun. Rev., 8: 663-667.
- Odabasi E., Turan M., Erdem H. *et al.* (2008) - *Does mud pack treatment have any clinical effect? A randomized controlled clinical study.* J. Altern. Complement. Med., 14: 559-565.
- Ozkurt S., Dönmez A., Zeki Karagülle M. *et al.* (2012) - *Balneotherapy in fibromyalgia: a single blind randomized controlled clinical study.* Rheumatol. Int., 32: 1949-1954.
- Potla R., Singh I.S., Atamas S.P. *et al.* (2015) - *Shifts in temperature within the physiologic range modify strand-specific expression of select human microRNAs.* RNA, 21: 1261-1273.
- Shani J., Barak S., Levi D. *et al.* (1985) - *Skin penetration of minerals in psoriatics and guinea pigs bathing in hypertonic salt solutions.* Pharmacol. Res., 17: 501-506.
- Shehata M., Schwarzmeier J.D., Hilgarth M. *et al.* (2006) - *Effect of combined spa-exercise on circulating TGF- β 1 levels in patients with ankylosing spondylitis.* Wien Klin. Wochenschr., 118: 266-272.
- Smith J.B., Knowlton R.P. & Agarwal S.S. (1978) - *Human lymphocyte responses are enhanced by culture at 40°C.* J. Immunol., 121: 691-696.
- Smith R.D. (1980) - *Bed rest at home for rheumatoid arthritis.* Arthritis Rheum., 23: 263-264.
- Sukenik S., Neumann L., Flusser D. *et al.* (1995) - *Balneotherapy for rheumatoid arthritis at the Dead Sea.* Isr. J. Med. Sci., 31: 210-214.
- Sukenik S., Baradin R., Codish S. *et al.* (2001) - *Balneotherapy at the Dead Sea area for patients with psoriatic arthritis and concomitant fibromyalgia.* Isr. Med. Assoc. J., 3: 147-150.
- Tamás G., Katalin T.I., Lajos K. *et al.* (2018) - *The effects of the calcium-magnesium-bicarbonate content in thermal mineral water on chronic low back pain: a randomized, controlled follow-up study.* Int. J. Biometeorol. [Epubahead of print].
- Tefner I.K., Gaál R., Koroknai A. *et al.* (2013) - *The effect of Neydharting mud-pack therapy on knee osteoarthritis: a randomized, controlled, double-blind follow-up pilot study.* Rheumatol. Int., 33: 2569-2576.
- Tenti S., Chelieschi S., Galeazzi M. *et al.* (2015) - *Spa therapy: can be a valid option for treating knee osteoarthritis?* Int. J. Biometeorol., 59: 1133-1143.
- Tureson C., Jacobsson L.T.H. & Matteson E.L. (2008) - *Cardiovascular co-morbidity in rheumatic diseases.* Vasc. Health Risk Manag., 43: 605-614.
- Valiutti S., Costellino F. & Musiani P. (1990) - *Effect of sulphurous (thermal) water on T lymphocyte proliferative response.* Ann. Allergy, 65: 463-468.
- Van Tubergen A., Landewé R., van der Hetijede D. *et al.* (2001) - *Combined Spa-Exercise therapy is effective in patients with ankylosing spondylitis: a randomized controlled trial.* Arthritis Care Res., 45: 430-438.
- Van Tubergen A., Boonen A., Landewé R. *et al.* (2002) - *Cost effectiveness of combined spa-exercise therapy in ankylosing spondylitis: a randomized controlled trial.* Arthritis Rheum., 47:459-467.
- Vasan R.S., Beiser A., D'Agostino R.B. *et al.* (2003) - *Plasma homocysteine and risk for congestive heart failure in adult without prior myocardial infarction.* Jama, 289: 1251-1257.
- Verhagen A.P., Bierma-Zeinstra S.M.A., Boers M. *et al.* (2007) - *Balneotherapy for osteoarthritis.* Cochrane database of systemic reviews (4): CD006864.
- Vescovi P.P., Gerra G., Pioli G. *et al.* (1990) - *Circulating opioid peptides during thermal stress.* Horm. Metab. Res., 22: 44-46.
- Zijlstra T.R., Braakman-Jansen L.M. & Taal E. (2007) - *Cost-effectiveness of Spa treatment for fibromyalgia: general health improvement is not for free.* Rheumatology (Oxford), 46: 1454-1459.

Gli habitat, la flora e la fauna degli ambienti termali della Toscana meridionale

Leonardo Favilli¹, Andrea Benocci², Claudia Angiolini³, Giuseppe Manganelli¹

¹ Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Via P.A. Mattioli 4, 53100 Siena.

² Museo di Storia Naturale dell'Accademia dei Fisiocritici, Piazzetta S. Gigli 2, 53100 Siena.

³ Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze della Vita, Via P.A. Mattioli 4, 53100 Siena, giuseppe.manganelli@unisi.it

Le acque termominerali della Toscana meridionale

La Toscana è una delle regioni italiane con il maggior numero di sorgenti termominerali, molte delle quali sono state utilizzate fin dall'antichità per scopi balneo-terapeutici. Insieme a queste ce ne sono molte altre meno note perché caratterizzate da proprietà terapeutiche minori o da portata inferiore, talvolta costituite da semplici polle che fuoriescono in aperta campagna o in mezzo a insediamenti residenziali, commerciali e industriali.

Una buona parte di queste sorgenti termominerali si trovano nel settore centro-meridionale della regione corrispondente al territorio delle province di Livorno, Siena e Grosseto. La loro origine è dovuta alle acque meteoriche che penetrano in profondità e circolano nella crosta terrestre dove acquistano calore man mano che giungono in contatto con rocce sempre più calde e si arricchiscono per dissoluzione di elementi minerali e di altre sostanze che vengono mantenuti in quantità variabili a seconda dei casi fino al momento in cui fuoriescono in corrispondenza di fratture o faglie della crosta terrestre.

Le sorgenti termali della Toscana meridionale hanno temperatura media annua molto variabile, compresa tra i 19°C delle Vene di Onci e i 49°C dei Bagni delle Galleraie. In base alle caratteristiche geochimiche possono essere suddivise in tre gruppi: quello delle acque bicarbonato-alcalino terrose, ricche di Ca^{++} e CO_3^- e il cui chimismo è dovuto alla circolazione attraverso rocce carbonatiche; quello delle acque solfato-alcalino terrose, ricche di ioni Ca^{++} e SO_4^- , im-

mediatamente riconoscibili per il forte odore di zolfo che emanano, il cui chimismo viene acquisito in seguito alla circolazione in rocce evaporitiche; quello delle acque clorurato-alcaline, ricche di ioni Na^+ e Cl^- , acquisiti durante la circolazione delle acque attraverso rocce cristalline o in seguito al loro mescolamento con le condense prodotte dei vapori geotermici o nel momento in cui, risalendo in superficie, attraversano sedimenti argillosi marini di età pliocenica.

Habitat, flora e fauna peculiari

Le sorgenti termominerali costituiscono ambienti estremi, spesso ostili, che per essere stabilmente colonizzati impongono agli organismi viventi spiccate capacità di adattamento al particolare chimismo e alle temperature che le caratterizzano. Tra tutte, quelle più difficilmente colonizzabili e quindi più povere in specie, sono le sorgenti con acque solfato-alcalino terrose a causa dell'alto contenuto di idrogeno solforato e quelle che presentano valori di temperatura costantemente superiori a 40°C (acque ipertermali). Le altre, quelle con temperatura compresa tra 20°C e 40°C (acque ipotermali, omeotermali e termali) risultano più ricche.

In prossimità di sorgenti e pareti soggette a stillicidio riescono a insediarsi comunità vegetali a prevalenza di piante non vascolari, che contribuiscono alla formazione di travertini per deposito di carbonato di calcio sulle fronde. Si tratta di comunità caratterizzate fisionomicamente da briofite igrofile e calcicole quali *Palustriella commutata*, *Bryum pallens*, *Pellia endiviifolia*,



Fig. 1. Le principali sorgenti termominerali della Toscana meridionale: 1 Terme del Calidario e sorgenti attigue (Campiglia Marittima, Livorno); 2 Bagni delle Galleraie (Radicondoli, Siena); 3 Le Caldane o Bagni di San Marziale e le Vene di Onci (Colle di Val d'Elsa, Siena); 4 Terme di Roselle (Grosseto); 5 Terme di Petriolo (Monticiano-Civitella Paganico, Siena-Grosseto); 6 Acqua Borra (Castelnuovo Berardenga, Siena); 7 Terme di San Giovanni e Antica Querciolaia (Rapolano Terme, Siena); 8 Terme di Saturnia (Manciano, Grosseto); 9 Bagno Vignoni (San Quirico d'Orcia, Siena); 10 Bagni di San Filippo (Castiglione d'Orcia, Siena); 11 Terme di Montepulciano o di Sant'Albino (Montepulciano, Siena); 12 Terme di San Casciano dei Bagni (San Casciano dei Bagni, Siena); 13 Terme di Sant'Elena (Chianciano Terme, Siena); 14 Bagno Santo (Sarteano, Siena).

Pellia epiphylla, che colonizzano usualmente le stazioni in ombra. Le comunità vegetali caratteristiche sono perciò spiccatamente igro-idrofile, riferibili all'alleanza *Cratoneurion commutati*, molto sensibili alle variazioni idriche attorno al luogo di origine, sia stagionali che dovute a prelievo o canalizzazione delle acque da parte dell'uomo. Queste cenosi vengono riferite, secondo la Direttiva 92/43/CEE, all'habitat prioritario di interesse comunitario "7220* *Sorgenti pietrificanti con formazione di tufi (Cratoneurion)*", che occupa spesso superfici ridotte e risulta molto vulnerabile dipendendo dalla qualità delle acque e dalla loro disponibilità. Nella Toscana centro-meridionale questo habitat è noto solo per le aree termali dell'Acqua Borra, de Le Caldane, dei Bagni di Petriolo e dei Bagni San Filippo. Non si può tuttavia escluderne la presenza in altre zone termali, considerate le scarse conoscenze disponibili sulla distribuzione toscana delle cenosi del *Cratoneurion*, per le quali sarebbe davvero auspicabile un censimento su tutto il territorio regionale. Quando le condizioni ambientali tendono alla siccità, le comunità a briofite sono sostituite da piante vascolari xerocalcicole, che vanno a costituire pratelli annuali e prati perenni. Tra queste essenze, risultano di particolare interesse: *Linaria simplex*, una microfita calcicola segnalata in Toscana dopo il 1950 solo per i travertini di Bagno Vignoni e Rapolano Terme, molto rara

nell'Italia centrale tirrenica; *Serratula cichoracea*, specie calcicola a distribuzione mediterranea sudoccidentale, che nella stazione di Bagno Vignoni, dove vegeta, raggiunge il limite settentrionale del suo areale; *Buxus sempervirens*, specie artoterziaria a distribuzione submediterraneo-subatlantica che nel senese è nota per diverse stazioni in buona parte legate ad ambienti termali dove probabilmente, grazie alle sorgenti, si crea un particolare microclima caldo-umido, favorevole a questa entità. Ma sicuramente la pianta vascolare di maggior interesse di questi biotopi termali è un'endemita dell'Italia centro-occidentale, *Agrostis canina* L. subsp. *monteluccii*, descritto da Federico Selvi per la solfatara di Grotte Santo Stefano, in provincia di Viterbo, ed elevato a rango di specie da Enrico Banfi nella Checklist della flora vascolare italiana curata da Fabio Conti e collaboratori (2005). Questa entità, già osservata in aree geotermiche toscane con suoli carbonatici nel 1795 da Giorgio Santi, presenta un'ecologia peculiare, essendo legata ad ambienti con sensibili anomalie di concentrazione atmosferica di CO_2 e presenza di H_2S , forte acidità del substrato e conseguente presenza di notevoli concentrazioni di alluminio solubile, ed è stata rinvenuta in Toscana centro-meridionale al Bossoleto di Rapolano Terme e alla mofeta di Carpineto presso Vagliagli, nel comune di Castelnuovo Berardenga.



Foto 1. *Linaria simplex* è molto rara in Italia centrale e in Toscana dopo il 1950 è stata segnalata soltanto per Bagno Vignoni e Rapolano Terme. Si tratta di una microfita calcicola che va a costituire pratelli annuali e prati perenni in prossimità delle sorgenti quando le condizioni ambientali tendono alla siccità (© Fabio Tognazzi).

Per quanto riguarda la fauna, la componente preponderante è costituita da specie, sia native che aliene, viventi in un'ampia varietà di ambienti acquatici che, grazie alla loro spiccata euritermia e alofilia, riescono a colonizzare anche i biotopi termali. Insieme a queste specie, non esclusive delle acque termominerali, ne sono presenti però altre appartenenti a due gruppi con un significato completamente opposto: il primo è costituito da endemiti toscani, il secondo da organismi alieni originari di aree tropicali.

Nel primo contingente rientrano due molluschi gasteropodi: *Melanopsis etrusca* e *Belgrandia bonelliana*, che rappresentano senza dubbio le specie più importanti delle acque termali toscane. *Melanopsis etrusca* ha infatti una diffusione molto ridotta, limitata alla Maremma toscana, dove è presente solo in una decina di siti della province di Grosseto e Livorno. Si tratta di un gasteropode di dimensioni medio-piccole, provvisto di una conchiglia conica, robusta, di colore variabile dal bruno scuro al nerastro con riflessi violacei. Appartiene a un gruppo molto antico,

i Cerithioidea, diffuso negli ambienti marini costieri e negli ambienti salmastri di tutto il mondo. La famiglia Melanopsidae si è distaccata dagli altri cerithioidei circa 90 milioni di anni fa, in pieno Cretaceo, colonizzando le acque interne lungo l'Oceano della Tetide; oggi ha una distribuzione disgiunta essendo presente nell'area euro-mediterranea (Europa meridionale, Nord Africa e Medio Oriente) e, agli antipodi, in Nuova Zelanda. Attualmente una quindicina di specie vivono nel settore boreale dell'areale, una sola della quali, appunto *Melanopsis etrusca*, si trova in Italia. Fino a un recente passato questa specie era un po' più diffusa ma oggi si trova solamente nell'area delle sorgenti del Calidario, in quella delle terme di Roselle e in altre tre-quattro sorgenti e polle termominerali minori; purtroppo, anche dove rimasta, le sue popolazioni sembrano in progressivo declino causato probabilmente dalla distruzione di habitat per interrimento delle pozze, prelievo idrico e inquinamento. Per queste ragioni è inserita nella Red List dell'IUCN come "Endangered" e inclusa negli allegati A e B della Legge Regionale 56/2000 come specie protetta la cui presenza può richiedere l'istituzione di Siti di Importanza Regionale (SIR).

L'altro gasteropode, *Belgrandia bonelliana*, ha una distribuzione ancora più ridotta essendo presente soltanto nelle acque termali di Sarteano. Descritta nel



Foto 2. *Melanopsis etrusca* è una delle specie più importanti delle acque termali toscane. È un gasteropode endemico della Maremma toscana (Terme del Calidario, Terme di Roselle e altre tre-quattro sorgenti e polle termominerali minori del livornese e del grossetano) in progressivo declino a causa della distruzione dell'habitat per interrimento delle pozze, prelievo idrico e inquinamento. Appartiene a una famiglia di origine molto antica che attualmente ha una distribuzione disgiunta essendo presente nell'area euro-mediterranea (Europa meridionale, Nord Africa e Medio Oriente) e in Nuova Zelanda (© Giacomo Radi).

1879 dal geologo Carlo De Stefani, che la dedicò al medico senese Silverio Bonelli, appartiene ad una famiglia (Hydrobiidae) che comprende un migliaio di specie di piccolissime dimensioni presenti nelle acque dolci superficiali e sotterranee di quasi tutto l'emisfero settentrionale. Gli appartenenti al genere *Belgrandia* sono gasteropodi di dimensioni molto piccole, con una conchiglia cilindro-conica o conica, biancastra ma spesso incrostata e quindi di colore diverso, che vivono sulla vegetazione sommersa, su ciottoli e sassi, oppure sulle pareti delle vasche sorgive. *Belgrandia bonelliana* ha un areale ridottissimo e sembra molto meno comune di una volta: è probabile che sia l'inquinamento (di origine agricola e domestica) che lo sfruttamento delle acque per fini termali giochino un ruolo nel suo declino. La specie, ritenuta a serio rischio di estinzione, è quindi inclusa nella Red List dell'IUCN come "Critically Endangered". Oltre a questi due endemiti, nelle acque termali possono essere presenti altri due gasteropodi, *Theodoxus fluviatilis* e *Belgrandia thermalis* che però hanno una diffusione geografica e una valenza ambientale più ampia.

Nel secondo gruppo, quello degli alieni tropicali, rientra un certo numero di specie ittiche la cui presenza è dovuta al rilascio intenzionale da parte di acquariofili di esemplari in sovrannumero o non più "graditi" nelle vasche perché aggressivi nei confronti degli altri pesci o perché una volta adulti raggiungono dimensioni troppo grandi per essere allevati. Le specie fino ad oggi accertate sono: il pulitore comune (*Pterygoplichthys pardalis*), originario del bacino del Rio delle Amazzoni in America meridionale; il black molly (*Poecilia sphenops*) e il ciclode zebra (*Amatitlania nigrofasciata*), nativi nei corsi d'acqua dell'America centrale; la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) e il pesce gioiello (*Hemichromis bimaculatus*), originari rispettivamente dell'Africa centrale e/o dell'Africa occidentale e presenti nelle terme del Calidario e nelle sorgenti attigue (Caldana e Caneto); il guppy (*Poecilia reticulata*), proveniente dai corsi d'acqua dell'America meridionale; il platy (*Xiphophorus maculatus*), originario dell'America centrale, e il pesce testa di serpente (*Channa micropeltes*), una volta diffuso solo nel Sudest asiatico, costituiscono la quasi totalità della fauna ittica vivente ne Le Cal-



Foto 3. In seguito al rilascio avvenuto da parte di alcuni acquariofili nella sorgente de Le Caldane (Colle di Val d'Elsa, Siena) sono recentemente comparsi il platy (*Xiphophorus maculatus*) e il guppy (*Poecilia reticulata*), due specie di pesci propri di acque tropicali (© Giovanni Cappelli).

dane (o Bagni di San Marziale). Alcune di queste specie sono state documentate con singoli esemplari e rappresentano presenze effimere (pulitore comune, black molly e pesce testa di serpente), altre presentano invece popolazioni consistenti e più o meno strutturate (ciclode zebra, tilapia del Nilo, pesce gioiello, guppy e platy) e possono essere considerate acclimatate, rendendo veramente caratteristica e unica la fauna di questi biotopi termali. La loro sopravvivenza e la loro acclimatazione è stata possibile grazie alle temperature elevate e abbastanza costanti durante tutto l'anno, simili a quelle degli ambienti nativi o comunque comprese nell'ambito entro il quale possono svolgersi i cicli vitali.

E' possibile uno sfruttamento ecosostenibile?

Gran parte delle sorgenti termominerali della Toscana sono state utilizzate fin dall'antichità per scopi

balneo-terapeutici, per la prevenzione e il trattamento di numerose patologie (reumatiche, respiratorie, dell'apparato gastroenterico, vascolari, dermatologiche, ecc.) e per la riabilitazione motoria. Ciò ha portato allo sconvolgimento delle caratteristiche originarie di questi biotopi, cementificati in tempi diversi per costruirvi stabilimenti termali e, più recentemente, centri benessere noti e apprezzati a livello mondiale. Altre sorgenti sono state imbrigliate per essere sfruttate per scopi irrigui e idropotabili o si sono esaurite per abbassamento della falda freatica causato dalle attività di escavazione mineraria e dall'eccessivo prelievo di acqua. Molte risentono negativamente dell'inquinamento di origine civile, industriale e agricola, originandosi spesso in contesti fortemente urbanizzati o sottoposti ad agricoltura intensiva. In altre ancora sono stati introdotti elementi floristici e faunistici alloctoni che hanno compromesso seriamente lo stato di conservazione della flora e della fauna native, portando alla rarefazione o alla locale estinzione di specie in seguito all'instaurarsi di fenomeni di competizione e predazione: è questo il caso del gasteropode endemico *Melanopsis etrusca*, estinto in buona parte

delle sorgenti termominerali livornesi e grossetane e del ciprinide rovello (*Rutilus rubilio*), presente con bassissime densità di popolazione nelle sorgenti attigue al Calidario nel livornese.

Purtroppo quasi tutte le sorgenti termominerali sono situate al di fuori dei limiti delle ZSC (Zone Speciali di Conservazione) istituite ai sensi dell'applicazione a livello nazionale e regionale della Direttiva 92/43/CEE (Direttiva "Habitat"): solamente l'Acqua Borra, nel comune di Castelnuovo Berardenga (Siena) e le Terme di Petriolo, nei comuni di Monticiano e di Civitella Paganico (Siena-Grosseto) sono comprese all'interno, rispettivamente, della ZSC IT5190004 "Crete Camposodo e Crete di Leonina" e della ZSC IT51A0003 "Val di Farma". Inoltre soltanto altri due siti termali, il Bagno Santo di Sarteano (Siena) e le Terme di San Giovanni di Rapolano Terme (Siena), sono elencate tra i Geotipi di Importanza Regionale meritevoli di tutela istituiti sempre in applicazione della Direttiva 92/43/CEE.

Quindi sarebbe per lo meno auspicabile un ampliamento dei confini di quelle ZSC della Toscana meridionale presso le quali si trovano sorgenti ter-



Foto 4. La sorgente dell'Acqua Borra è attualmente completamente artificializzata: il piazzale circostante è stato coperto con breccia calcarea e le acque sorgive sono state captate, riversate in una vasca in muratura e canalizzate fino al vicino Fosso Malena. Interventi di questo tipo alterano in modo irreversibile questi siti il cui valore scientifico e conservazionistico è evidenziato dalla presenza di habitat e di specie di interesse comunitario. Per questo motivo andrebbe urgentemente considerato un intervento di ripristino per recuperare almeno alcune delle originarie caratteristiche di naturalità (© Giovanni Cappelli).

minerali o l'istituzione di nuove in corrispondenza di quelle naturalisticamente e paesaggisticamente più interessanti. Questo fatto dovrebbe garantire, almeno sulla carta, un minimo di protezione a que-

sti biotopi ancora poco studiati relativamente agli aspetti floristici e faunistici ma di rilevante interesse conservazionistico e ad alto rischio di scomparsa per il crescente impatto delle attività antropiche.

Bibliografia

Angiolini C. & Scoppola A. (1999) - *Segnalazioni floristiche italiane: 943*. *Linaria simplex* (Willd.) DC. *Informatore Botanico Italiano*, 31(1-3): 87.

Binaghi G. (1966) - *Notizie sulla coleottero fauna acquaiola delle sorgenti termali di Bagni San Filippo alle falde del M.te Amiata*. *Bollettino della Società Entomologica Italiana*, 96: 27-30.

Bonini I., Casini F., Chiarucci A. & De Dominicis V. (2005) - *The bryophyte flora of the geothermal field of Sasso Pisano (Pisa, Italy)*. *Cryptogamie, Briologie*, 26: 291-299.

Chiarucci A., Calderisi M., Casini F. & Bonini I. (2008) - *Vegetation at the limits for vegetation: vascular plants, bryophytes and lichens in a geothermal field*. *Folia Geobotanica*, 43: 19-33.

Cianfanelli S. (2010) - *Melanopsis etrusca*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2010: e.T40077A10300265*. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-4.RLTS.T40077A10300265.en>. Downloaded on 21 January 2018.

Cianfanelli S., Giusti F., Manganelli G. & Bodon M. (2010) - *Belgrandia bonelliana*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2010: e.T156090A4891950*. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-4.RLTS.T156090A4891950.en>. Downloaded on 21 January 2018.

Conti, F., Bonacquisti, S. & Abbate, G. (a cura di) (2005) - *An annotated checklist of the Italian vascular flora*. 420 pp., Palombi, Roma.

Costantini A. (a cura di) (2015) - *Geositi: eccellenze della natura nel Parco delle Colline Metallifere-Tuscan mining geopark*. 302 pp., Pacini Editore, Ospedaletto (Pisa).

Costantini A. (a cura di) (2015) - *Geotipi di Importanza Regionale nelle province di Siena e Grosseto*. 231 pp., Pacini Editore, Ospedaletto (Pisa).

De Dominicis V., Chiarucci A., Gabellini A., Selvi F., Favilli L. & Morrocchi D. (1998) - *ANPIL del Fiume Elsa. Studio fitoecologico e faunistico con proposte gestionali*. Dipartimento di Biologia Ambientale Università di Siena, Comune di Colle di Val d'Elsa. Inedito.

Favilli L., Piazzini S., Barbato D., Manganelli G. (2018) - *Acclimatization of Poecilia reticulata (Peters, 1859) and Xiphophorus maculatus (Günther, 1866) (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) in central Italy*. *Journal of Applied Ichthyology*, doi.org/10.1111/jai.13599.

Issel R. (1900) - *Saggio sulla fauna termale italiana*. *Atti della Reale Accademia delle Scienze di Torino Classe di Scienze Fisiche e Matematiche*, 36: 53-74, 265-277.

Issel R. (1901) - *Osservazioni sopra alcuni animali della fauna termale italiana*. *Atti della Società Ligustica di Scienze Naturali e Geografiche*, 11: 59-73, tavv. 1-2.

Mantelli F., Menichetti S. & Calà P. (2014) - *Principali emergenze termali in Toscana. Idrogeologia e chimica delle acque*. 378 pp., Regione Toscana, ARPAT, Firenze.

Miglietta F., Raschi A., Bettarini I., Resti R. & Selvi F. (1993) - *Natural CO₂ springs in Italy: a resource for examining long term response of vegetation to rising atmospheric CO₂ concentrations*. *Plant, Cell & Environment*, 16: 873-878.

Neubauer T.A., Harzhauser M., Mandic O., Georgopoulou E. & Kroh A. (2016) - *Paleobiogeography and historical biogeography of the non-marine caenogastropod family Melanopsidae*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 444: 124-143.

Piazzini S., Favilli L. & Manganelli G. (2016) - *Atlante dei pesci della provincia di Siena*. *Sistema delle Riserve Naturali della Provincia di Siena, Quaderni Naturalistici*, 5: 264 pp.

Piazzini S., Lori E., Favilli L., Cianfanelli S., Vanni S. & Manganelli G. (2010) - *A tropical fish community in thermal water of southern Tuscany*. *Biological Invasions*, 12: 2959-2965.

Piazzini S., Segos I., Favilli L., Manganelli G. (2014) - *The first European record of the Indonesian snakehead, Channa micropeltes (Actinopterygii: Perciformes: Channidae)*. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 44 (2): 153-155.

Rocchi S., Terzani F. & Mascagni A. (2002) - *Contributo alla conoscenza dei Coleotteri degli ambienti acquatici della Toscana (Italia)*. III. Helophoridae, Hydrochidae, Hydrophilidae, Spercheidae, Sphaeriusidae, Georissidae (Coleoptera). *Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno*, 16: 7-59.

Scoppola A., Angiolini C. (2001) - *Therophytic vegetation on carbonate soils of central Tyrrhenian Italy: synecology and syntaxonomy*. *Fitosociologia*, 38(1): 77-89.

Selvi F. (1994) - *Agrostis canina L. subsp. montelucii Selvi, subsp. nov. (Poaceae)*. *Webbia*, 49: 51-58.

Selvi F. (1998) - *Flora of the mineral CO₂ spring "Bossoleto" (Rapolano Terme, Tuscany) and its relevance to ecological research*. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie B*, 105: 23-30.

Terzani F. (1986) - *Gli Odonati della provincia di Grosseto (XI contributo alla conoscenza degli Odonati italiani)*. *Atti del Museo Civico di Storia Naturale (Grosseto)*, 7/8: 33-51.

Viti M. & Tavarnelli E. (2018) - *Geotermia nella Toscana meridionale: una risorsa importante da gestire con cura*. *EtruriaNatura*, 12: 10-24.

La risorsa geotermica nella Toscana meridionale, con particolare riferimento alla bassa entalpia

Giacomo Biserni*, Massimo Salleolini**

* Studio Ecogeo, Piazza del sale 10 - 58100 Grosseto (info@studioecogeo.com)

** Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, via Laterina 8 - 53100 Siena (massimo.salleolini@unisi.it)

«Di tutte le fonti di energia,
il calore umano è quella meno costosa»

Anonimo

La disponibilità del calore terrestre è illimitata rispetto alla scala temporale umana e, quindi, l'energia geotermica è da considerarsi una risorsa rinnovabile e fruibile a lungo per le generazioni future; correttamente sfruttata, essa può assumere un ruolo significativo nel bilancio energetico di numerosi paesi. Le risorse geotermiche italiane, potenzialmente estraibili fino a 5 km di profondità, sono stimate in $21 \cdot 10^{18}$ J ($500 \cdot 10^6$ tonnellate equivalenti petrolio), di cui circa due terzi hanno temperature inferiori a 150 °C (medio - bassa entalpia). Negli ultimi decenni si è sviluppato un crescente interesse nei confronti del risparmio energetico e della produzione di energia da fonti rinnovabili: ebbene, la geotermia a bassa entalpia fornisce risposte concrete a questi quesiti, costituendo una fonte energetica alternativa, inesauribile, gratuita, disponibile ovunque e in ogni momento, pulita (con riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti che può arrivare al 70% di un tradizionale impianto a gas). Va da sé che nelle fasi di progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti, riguardanti lo sfruttamento della risorsa geotermica, la corretta conoscenza della componente geologica risulti essenziale.

Introduzione

Il calore interno della Terra costituisce un'importante risorsa energetica, la cosiddetta "energia geotermica"; esso trae origine da vari fenomeni tra i quali il decadimento di elementi radioattivi (in particolare, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K) ne rappresenta all'incirca la metà (The KamLAND Collaboration, 2011). Questo calore si trasferisce in superficie per "conduzione" (senza trasporto di materia) e, più raramente, per "convezione" (con trasporto di materia); ovviamente, quest'ultimo trasferimento risulta possibile nei casi in cui la permeabilità primaria e/o secondaria delle rocce consente la circolazione di fluidi (Foto 1). Allo stato attuale della tecnologia, solo la convezione termica veicolata dall'acqua sotterranea riveste importanza economica.

Il 4 luglio 1904 Piero Ginori Conti introdusse a Larderello l'uso dell'energia geotermica per produrre elettricità, sperimentando il primo generatore geotermico. Attualmente, 25 nazioni estraggono da siti geotermici calore sufficiente a garantire il riscaldamento di oltre $2 \cdot 10^6$ di abitazioni in climi freddi ed elettricità per più di $1,5 \cdot 10^6$ di abitazioni (Foto 2); la potenza elettrica geotermica installata è di circa 12GW¹ su scala mondiale, con in testa gli Stati Uniti (circa 3,5 GW) seguiti da Filippine,



Foto 1. Emergenze naturali di fluidi geotermici (Islanda).



Foto 2. La geotermia è la fortuna energetica dell'Islanda; da essa deriva il 25 % dell'elettricità ed il 90 % del riscaldamento. A sinistra, veduta aerea di una centrale geotermoelettrica; a destra, laghetto artificiale alimentato dalle acque calde (circa 90 °C) scaricate da una centrale ed attrezzato per attività balneo-terapeutiche (dintorni di Reykjavik).

Indonesia, Messico, Nuova Zelanda ed Italia (916 MW) (Holm *et al.*, 2010; Bertani, 2016).

Il quantitativo unitario medio del calore proveniente dall'interno della Terra² non è uniformemente distribuito sulla superficie terrestre; esso risulta sensibilmente diverso lungo alcune fasce geografiche, in genere interessate da particolare mobilità crostale, nelle quali anche il gradiente

si discosta notevolmente dai valori medi. Queste aree, dette di "anomalia geotermica", possono essere classificate in base all'estensione delle loro manifestazioni (regionali o locali), alla loro distribuzione lungo fasce o in zone limitate e circoscritte, al carattere primario o secondario dell'origine geotermica. In Italia, le situazioni a più elevata entalpia³ (Larderello, M. Amiata, Latera, ecc.)

2. Il flusso di calore dalla Terra allo spazio è pari a 44 TW, che è solo lo 0,05 % del calore che il pianeta riceve dal Sole. L'unità di misura del flusso di calore è l'HFU (*Heat Flow Unit* = $1 \mu\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ sec}$), ma viene usato anche il mW/m^2 . Il flusso di calore medio terrestre è $87 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Pollack *et al.*, 1993; Dickson & Fanelli, 2003); nelle zone di Larderello e del M. Amiata esso supera i $300 \text{ mW}/\text{m}^2$ e raggiunge i $120 \text{ mW}/\text{m}^2$ nella parte settentrionale del Graben di Siena (Barazzuoli *et al.*, 1988). Per "gradiente geotermico" si intende l'aumento di temperatura che si rileva procedendo dalla superficie verso l'interno della crosta terrestre; il relativo valore medio, nella parte più esterna, è di circa $3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

3. In geotermia si usa correntemente, al posto di temperatura, il termine *entalpia*; essa è definita come la quantità di calore assorbita o ceduta da un sistema nel caso di una sua trasformazione isobara, cioè a pressione costante.

1. Il watt (W) è l'unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale; essa è pari a un *joule* al secondo (J/sec) ed è equivalente, in unità elettriche, a un volt per ampere. Multipli sono il *kilowatt* (kW = 10^3 W), il *megawatt* (MW = 10^6 W), il *gigawatt* (GW = 10^9 W) ed il *terawatt* (TW = 10^{12} W).

sono determinate da anomalie a carattere locale (strutture vulcaniche, *stock* intrusivi recenti); negli altri casi, tali anomalie producono generalmente sistemi geotermici a medio-bassa entalpia.

Nella Toscana meridionale si rinvencono zone geotermiche tra le più importanti del nostro pianeta. Ciò è dovuto alla concomitante presenza di condizioni che favoriscono l'esistenza di serbatoi potenzialmente sfruttabili: 1) un elevato flusso di calore che si traduce in un anomalo stato termico del sottosuolo; 2) degli ammassi rocciosi dotati di buona o elevata permeabilità (serbatoi) che si trovano a convenienti profondità e al di sotto di una o più formazioni impermeabili (coperture); 3) un adeguato approvvigionamento idrico proveniente dalla superficie.

Il presente articolo vuole descrivere in modo sintetico le caratteristiche geotermiche dell'area considerata, in virtù delle quali vi emergono anche sorgenti termominerali (dotate cioè di particolari proprietà fisiche e terapeutiche), nonché i possibili utilizzi di questa peculiare risorsa.

Sorgenti termominerali

La Toscana meridionale è caratterizzata da numerose sorgenti termominerali, molte delle quali note da lungo tempo ed utilizzate a scopo balneo-terapeutico, che sono legate a particolari circuiti idrogeologici (Fig. 1). Le acque meteoriche penetrano nella crosta terrestre e circolano in profondità assumendo calore dal contatto con gli strati sempre più caldi (secondo un gradiente geotermico normale o anomalo) e prendendo in carico, per dissoluzione, sostanze varie; il contenuto minerale ed il livello termico, così acquisiti, vengono talvolta in gran parte conservati dall'acqua fino alla sua emergenza in superficie perlopiù attraverso faglie. Secondo Minissale *et al.* (1997) queste acque mostrano in genere le seguenti peculiarità: a) valori sostanzialmente costanti di portata e composizione chimica ed isotopica; b) un'origine meteorica testimoniata dai rapporti isotopici⁴ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$; c) una residenza nel sottosuolo relativamente lunga (> 40 anni) indicata dai bassi valori di trizio⁵.



Foto 3. Il geyser Strokkur, ubicato nell'oasi di Geysir (Islanda), erutta un getto d'acqua alto circa 30 m ad intervalli irregolari di 3-5 minuti; il peso della colonna d'acqua riesce per pochi istanti a contrastare la spinta dovuta all'ebollizione, con la formazione di una specie di cupola contenente vapore acqueo ed altri gas. A breve distanza, è situato il Grande Geyser (ora inattivo), dal quale prendono il nome tutti i geyser del mondo.

Queste sorgenti sono talvolta connesse a particolari regimi termici (*geyser*) o fenomeni idrodinamici (ad esempio, funzionamento a sifone), manifestandosi in modo intermittente (Foto 3 -4).

Un cenno particolare merita l'analisi delle loro caratteristiche geochimiche, sintetizzabili nei diagrammi della figura 2, che consente di evidenziarne due gruppi principali:

- quello delle acque bicarbonato-alcino terrose (campo A), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica $\text{Ca}^{++}\text{CO}_3^-$ come riflesso di una prevalente circolazione in rocce carbonatiche (un esempio è costituito dalla sorgente delle Terme di S. Giovanni; Foto 5);
- quello delle acque solfato-alcino terrose (campo B), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica $\text{Ca}^{++}\text{SO}_4^-$ come riflesso di una prevalente circolazione in rocce anidritiche (esempi sono costituiti dalle sorgenti di Bagno Vignoni e delle Terme di Saturnia; Foto 6 - 7, Fig. 3).

In definitiva, sono le formazioni carbonatico-anidritiche mesozoiche della Falda toscana a costituire il serbatoio che alimenta le sorgenti.

Le acque rappresentate nel quadrante delle clorurato-alcine (campo C), dove la componente dominante è costituita dalla coppia ionica

Na^+Cl^- , sono in genere assai più ricche in sali di quelle precedenti, anche se molto meno diffuse; un esempio è fornito dall'Acqua Borra (Foto 8). Il loro chimismo, di più difficile interpretazione, è indicato come:

- derivato da una circolazione a livello delle rocce cristalline del basamento (Panichi, 1982);
- dovuto ad un miscelamento tra un'acqua di circolazione poco profonda e condense di vapori geotermici (Fancelli & Nuti, 1975; Barazzuoli *et al.*, 1988);
- acquisito durante la loro risalita negli spessi sedimenti argillosi marini del Pliocene (almeno per quelle che emergono all'interno del Bacino di Siena-Radicofani; Duchi *et al.*, 1992).

La distribuzione dei campioni nel diagramma di Piper della figura 2 indica che all'interno dei gruppi principali a) e b) si verifica qualche fenomeno responsabile delle deviazioni osservate (Panichi, 1982). Per quanto riguarda le acque bicarbonato-alcino terrose, si riconosce facilmente che solo alcune sono rappresentative di una circolazione in serie carbonatiche, mentre nelle altre si riscontra un progressivo miscelamento con acque circolanti in serie anidritiche. In relazione alle acque solfato-alcino terrose, le variazioni dei rapporti chimici sembrano at-

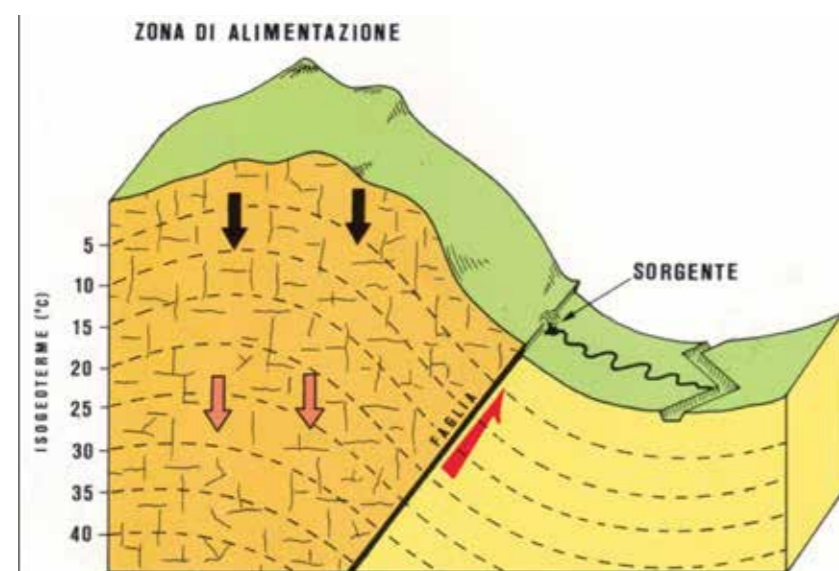


Fig. 1. Schema della circolazione idrica delle sorgenti termominerali (Barazzuoli & Salleolini, 1993).

4. I rapporti isotopici sono basati sul confronto tra la quantità misurata nel campione in esame rispetto a quella presente in un campione *standard*, in termini di rapporto tra gli isotopi pesante (raro) e leggero (comune); per gli isotopi stabili dell'acqua (^{18}O , ^2H), il riferimento è lo *Standard Mean Ocean Water* (SMOW).

5. Il trizio (o tritio) è l'isotopo radioattivo dell'idrogeno (^3H), con tempo di dimezzamento pari a 12,43 anni; esso viene utilizzato per calcolare l'età relativa dei campioni (cioè del tempo intercorso dalla separazione dal sistema atmosferico), in quanto presente in elevate concentrazioni nelle acque più giovani, coprendo un intervallo teorico di circa 50 anni.



Foto 7 - Una delle piscine formate dal corso d'acqua alimentato dallo stabilimento termale di Saturnia (Comune di Manciano). La sorgente mostra valori medi di temperatura e di portata rispettivamente intorno ai 38 °C e da 450 a 560 L/s (ARPAT, 2014).

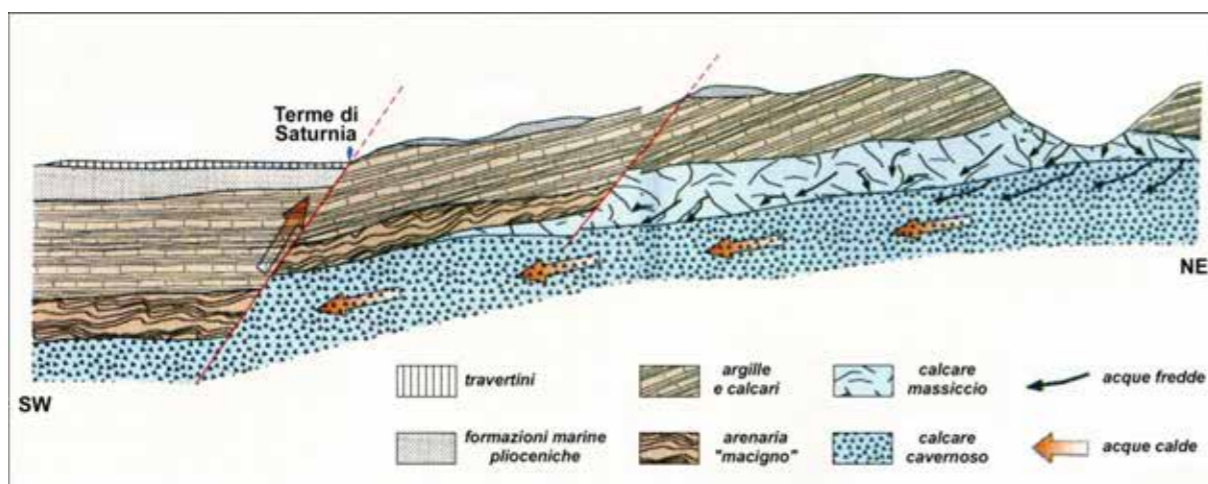


Fig. 3. Schema del circuito idrico sotterraneo nella formazione del "Calcare cavernoso" che alimenta le Terme di Saturnia (Chetoni, 2000, modificato). La zona di ricarica è costituita principalmente dall'affioramento della vasta formazione calcarea presente nella zona di San Martino sul Fiora, a cui si aggiungono apporti provenienti da Poggio il Sasso. Durante il percorso nel sottosuolo l'acqua raggiunge profondità superiori a 700 m e prende in soluzione i notevoli quantitativi di solfato di calcio che caratterizzano il "Calcare cavernoso". La sua rapida risalita entro la copertura argillosa impermeabile, permessa dalla presenza di una faglia dominante, spiega il fatto che sono mantenute pressoché intatte alla sorgente le caratteristiche termiche e saline. L'esame isotopico delle acque termali ha evidenziato che il loro tempo di residenza medio nel sottosuolo è dell'ordine dei 30-40 anni (Battaglia *et al.*, 1992; Minissale *et al.*, 1997; Barbagli *et al.*, 2013).

dominante⁸), con una potenza elettrica installata complessiva di oltre 900 MW ed una produzione energetica di quasi 5,7 TWh all'anno (Bertani, 2005, 2016; Conti *et al.*, 2016). Questi sistemi pro-

ducono fluidi contenuti principalmente nelle formazioni anidritiche e carbonatiche mesozoiche della Falda toscana, le quali sono caratterizzate da un'elevata permeabilità secondaria e ricoperte

in superficie temperature variabili tra 30 e 100 °C (Bertani, 2005). In genere il serbatoio non ha una copertura di rocce impermeabili ed è situato a bassa profondità; in superficie questi sistemi sono spesso associati a manifestazioni termali con temperature moderate. Quando invece il campo geotermico presenta una copertura impermeabile, l'acqua è in grado di raggiungere temperature maggiori di 100 °C, pur restando ancora in fase liquida, come avviene in una pentola a pressione.

8. In alcuni serbatoi geotermici, geologicamente simili ai precedenti, la temperatura è così elevata che il fluido è presente sotto forma di vapore secco, ad alto valore energetico: questo può essere inviato direttamente alla turbina dell'impianto. Il più grande serbatoio di questo tipo, sfruttato da più di 50 anni, è "The Geysir" (California, USA).



Foto 8. L'Acqua Borra (Comune di Castelnuovo Berardenga) ed i relativi depositi travertinosi; si tratta di una sorgente con valori medi di temperatura intorno ai 37 °C e di portata pari a 1 L/s.

da formazioni impermeabili giurassico-eoceniche e neogeniche; fluidi di buona qualità, in quantità commercialmente sfruttabili, vengono prodotti anche da fratture del sottostante basamento metamorfico fino ad oltre 4.000 m di profondità.

Dallo schema idrogeologico di figura 6 risulta chiaro come nell'area di Larderello siano presenti ampie zone, circondate da una spessa copertura impermeabile, dove l'infiltrazione delle acque meteoriche avviene nelle stesse formazioni che costituiscono il serbatoio geotermico. In corrispondenza della zona di produzione è altresì evidente la forte depressione della superficie piezometrica. Una conseguenza di questo intenso sfruttamento è la sostanziale scomparsa delle manifestazioni naturali (vapori, soffioni, *bulicami*, ecc.) che hanno caratterizzato il territorio per millenni (Foto 9).

La sezione della figura 7 mostra la peculiare situazione idrogeologica del M. Amiata. Le vulcaniti sono molto permeabili per fessurazione (e subordinatamente per porosità) e costituiscono un acquifero freatico alimentato solo dall'infiltrazione meteorica, frazione delle piogge e delle nevi cadute sul rilievo. Un complesso flyschoidale di bassa permeabilità le separa dal sottostante serbatoio geotermico (con temperature dell'ordine dei 200 °C) formato in

prevalenza da litotipi fratturati di facies toscana. In ambedue gli acquiferi la circolazione idrica è quella tipica delle "falde in rete"; più specificatamente, i deflussi seguono la diffusa micro-fratturazione della roccia e si concentrano nelle fratture beanti.

Un notevole incremento delle risorse geotermiche potrebbe essere ottenuto, in un prossimo futuro, dall'intensificarsi della produzione da serbatoi più profondi (oltre 4.000 m). Nella zona di Larderello i fluidi profondi sono stati rinvenuti in orizzonti fratturati all'interno delle formazioni metamorfiche e perfino nella parte superiore delle sottostanti intrusioni magmatiche granitoidi; alla sommità del serbatoio superficiale la temperatura supera localmente i 250 °C, mentre in profondità si distribuisce più uniformemente e supera i 400 °C. Il quadro emergente dall'esplorazione geotermica profonda nella Toscana meridionale si presenta assai incoraggiante dato che le dimensioni della zona termicamente anomala crescono enormemente con la profondità; nella zona di Larderello e Travale-Radicondoli, ad esempio, il sistema geotermico presenta all'incirca una superficie di 400 km² a 3.000-4.000 m di profondità, con temperature di 300-350 °C e pressioni di 6-7 MPa⁹ (Conti *et al.*, 2016). D'altra parte, in questa esplorazione si sono

9. Il *pascal* (Pa), unità di misura dello sforzo e della pressione nel Sistema Internazionale, equivale a un *newton* su metro quadrato (N/m²); è da considerare che, mentre sulla Terra la pressione atmosferica al livello del mare è pari a 0,1 MPa, sul pianeta Venere la pressione atmosferica è dell'ordine dei 9 MPa (MPa = *megapascal*, pari a 10⁶ Pa). Il *newton* (N), unità di misura della forza, è definito come la quantità di forza necessaria per imprimere a un chilogrammo di massa un'accelerazione di un metro al secondo quadrato.

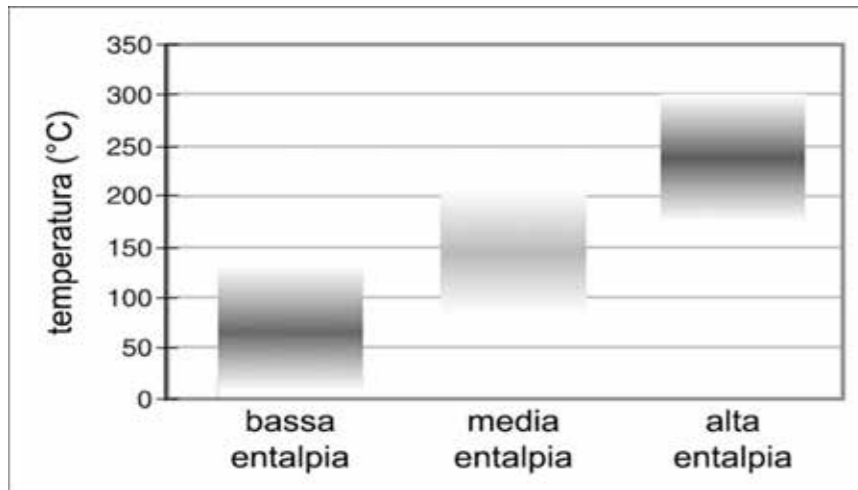


Fig. 4. Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura del fluido reperito (Banks, 2012, modificata).

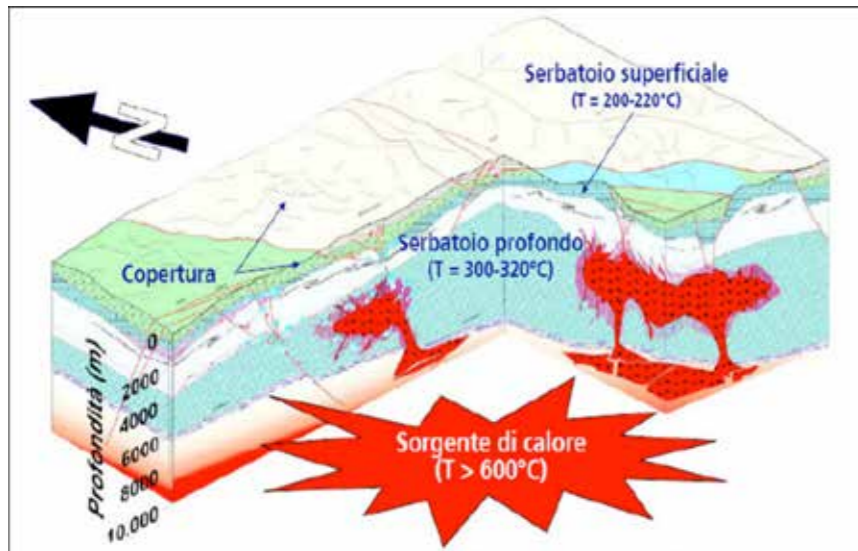


Fig. 5. Modello concettuale schematico dell'area geotermica di Larderello-Travale (Vaccaro, 2012).

manifestati anche diversi problemi legati alla distribuzione irregolare delle fratture (e quindi della permeabilità) nel basamento cristallino, alle altissime pressioni e temperature che vi si riscontrano (anche maggiori di 20 MPa e 400 °C) ed all'aggressività dei fluidi sugli strumenti di perforazione.

RISORSE A MEDIO-BASSA ENTALPIA

Il territorio italiano (in particolare, Toscana, Lazio e Campania) è interessato anche dall'ampia

diffusione di serbatoi termali relativamente superficiali, il cui contenuto calorico può essere convenientemente sfruttato non tanto per la produzione di energia elettrica quanto per finalità domestiche, agricole ed industriali. Un approccio di questo tipo, in verità poco diffuso nel nostro Paese, ha avuto nel tempo un aumento di consensi se non altro per l'introduzione di incentivi e sgravi fiscali (Tab. 1); il riscaldamento di ambienti, ad esempio, è realizzato per il 72 % con le cosiddette "pompe di calore" (514 MWtermici e 3.160 TJ/anno¹⁰, a fine 2015),

10. Il joule (J), unità di misura dell'energia, del lavoro e del calore nel Sistema Internazionale, è pari al lavoro compiuto dalla forza di 1 newton quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione della forza ($TJ = \text{terajoule} = 10^{12} \text{ J}$). In pratica, un joule corrisponde pari al lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 g per un metro, opponendosi alla forza di gravità terrestre.

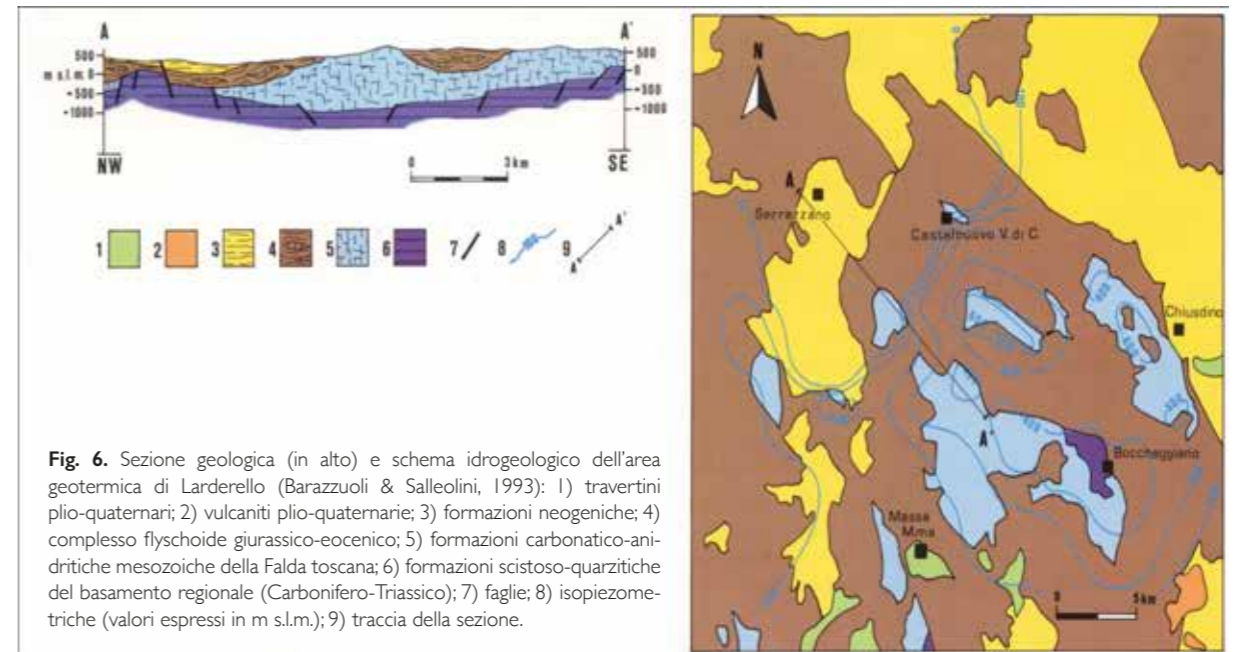


Fig. 6. Sezione geologica (in alto) e schema idrogeologico dell'area geotermica di Larderello (Barazzuoli & Salleolini, 1993): 1) travertini plio-quadernari; 2) vulcaniti plio-quadernarie; 3) formazioni neogeniche; 4) complesso flyschoidale giurassico-eocenico; 5) formazioni carbonatico-anidritiche mesozoiche della Falda toscana; 6) formazioni scistoso-quarzitiche del basamento regionale (Carbonifero-Triassico); 7) faglie; 8) isopiezometriche (valori espressi in m s.l.m.); 9) traccia della sezione.



Foto 9. Dal basso, in senso orario:
 • emissione naturale di vapori geotermici (Monterotondo Marittimo);
 • la Valle del Diavolo (Larderello) in una stampa del XIX secolo;
 • il bulicame, pozza d'acqua e fango in ebollizione.

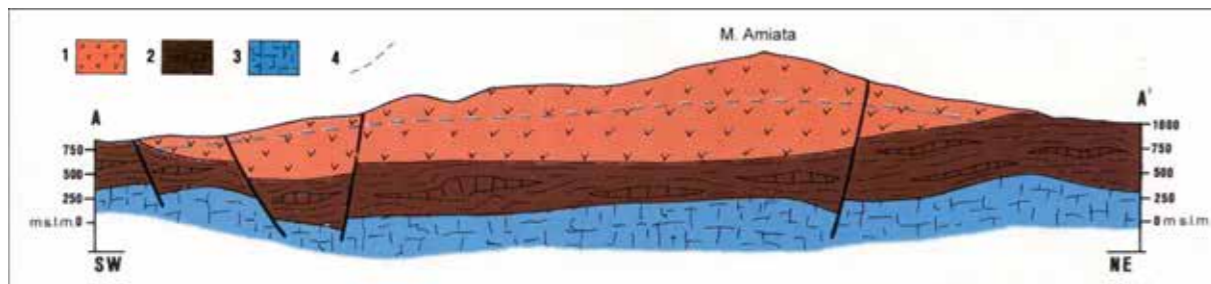


Fig. 7. Sezione idrogeologica del M. Amiata (Barazzuoli & Salleolini, 1993): 1) vulcaniti quaternarie; 2) complesso flyschoidale cretaceo; 3) formazioni carbonatiche-anidritiche mesozoiche; 4) limite di saturazione nell'acquifero vulcanico.

la cui potenza installata è più che raddoppiata negli ultimi anni. Grazie al lavoro svolto da un compressore elettrico in grado di realizzare un “ciclo frigorifero”, queste pompe consentono il trasferimento di energia termica da un corpo più freddo (il fluido geotermico accessibile a 5-20 °C tramite pozzi poco profondi) ad un altro a temperatura superiore; tale trasferimento non può avvenire in maniera spontanea perché comporterebbe una violazione del secondo principio della termodinamica¹¹.

L'impiego diretto dell'energia geotermica ha consentito un risparmio di 53 · 10⁶ tonnellate di petrolio su scala mondiale (Lund & Boyd, 2016), con una conseguente riduzione dell'inquinamento e dell'emissione di anidride carbonica nell'atmosfera (-149 · 10⁶ tonnellate di CO₂). Questa utilizzazione avviene soprattutto mediante le pompe di calore (55%), previste in forte diffusione nei prossimi decenni; altri importanti usi diretti sono il termalismo (20%), il riscaldamento di ambienti (15%) e la serricoltura (5%).

Nel settore settentrionale del Bacino di Siena sono state identificate (Barazzuoli *et al.*, 1988) zone di particolare interesse per l'impiego razionale delle risorse energetiche. Una delle più note è quella di Rapolano Terme (Fig. 8). Gli studi ivi condotti hanno permesso di schematizzare i circuiti idrotermali e di valutare il contributo locale alla ricarica del serbatoio principale, caratterizzato da temperature

comprese tra 60 e 80 °C. L'alto grado di correlazione esistente tra i parametri fisico-chimici delle emergenze locali è causato dal miscelamento, in varie proporzioni, tra acque più saline e profonde (tipo Terme di S. Giovanni) ed acque meno saline e più superficiali. Tutte le sorgenti appartengono allo stesso sistema geotermico (unico serbatoio con circolazione idrica principale nella successione carbonatica), ma si differenziano per il tipo di circuito idrotermale. Un'altra zona che si distingue è ubicata nei dintorni di Castelnuovo Berardenga. Essa è da considerarsi interessante perché, insieme alla presenza di un alto strutturale e di un elevato flusso di calore (circa 120 mW/m²), vi si riscontrano indicazioni geochemiche che testimoniano una circolazione idrica nel basamento cristallino (Fig. 9); inoltre, il serbatoio è ubicato ad una profondità di circa 600 m e presenta acque con temperature tra 80 e 100 °C. Quelle che fuoriescono, quindi, appaiono il risultato di un miscelamento tra un fluido proveniente dal basamento cristallino (ad alta temperatura e particolarmente ricco in Na⁺ e Cl⁻) ed un'acqua di circolazione in rocce carbonatiche, meno profonda, meno calda e ricca in Ca⁺⁺ e HCO₃⁻; comparabile con quelle emergenti a Rapolano Terme.

Gli impianti geotermici a bassa entalpia (temperatura del fluido < 90 °C) permettono lo sfruttamento del sottosuolo a fini energetici, anche in

Tabella I - Usi diretti del calore geotermico in Italia a fine 2015 e sviluppo nel periodo 2010-2015 (Conti *et al.*, 2016)

Uso	Potenza (fine 2015)		Energia (fine 2015)		Sviluppo 2010-2015	
	(MWtermici)	(%)	(TJ/anno)	(%)	Potenza (%)	Energia (%)
Riscaldamento di ambienti	716	52	4.445	42	+ 82	+ 71
Agricoltura	83	6	683	7	+ 21	+ 19
Itticoltura	120	9	1.869	18	- 1	- 3
Processi industriali	18	1	156	1	+ 26	+ 46
Balneologia termale	435	32	3.346	32	+ 4	- 3
TOTALE	1.372	100	10.499	100	+ 32	+ 30

assenza di anomalie termiche, mediante installazioni (sviluppate a profondità da qualche metro a non più di 200 m) che lo utilizzano come serbatoio termico da cui estrarre ed in cui introdurre calore. In altre parole, il calore sotterraneo viene sfruttato attraverso il diretto uso dell'acqua e

del terreno come fonti energetiche; con il giusto dimensionamento degli impianti (questi sono a bassa, 5-15 kWt, a media, 40-70 kWt, ad elevata potenza, > 100 kWt), tali elementi rappresentano accumulatori “infiniti” in grado di fornire durante l'anno calorie e frigorifici¹². Queste installazio-

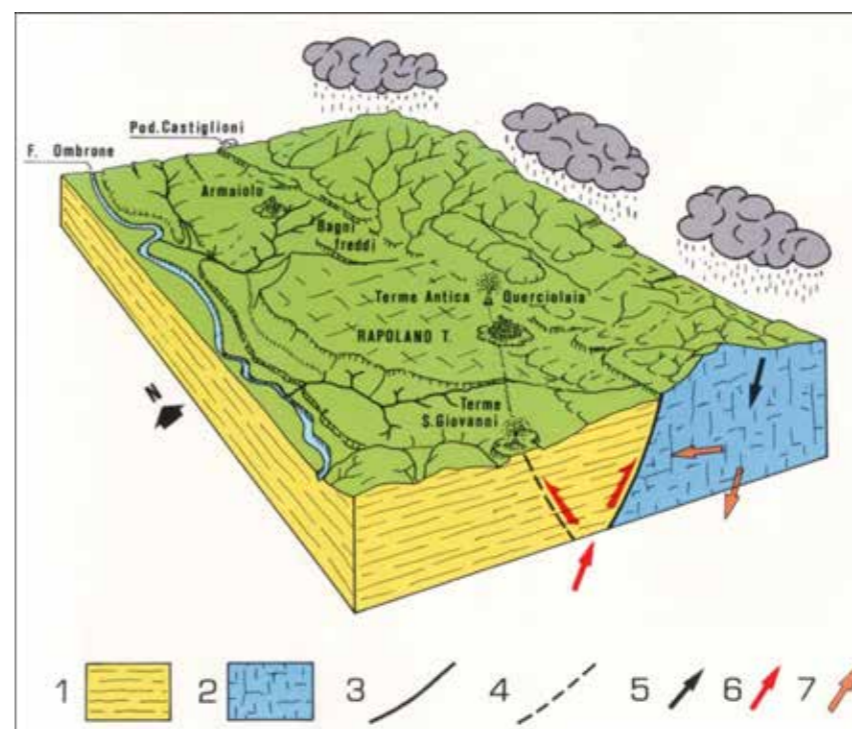


Fig. 8. Schema della situazione strutturale ed idrogeologica dell'area di Rapolano Terme (Barazzuoli *et al.*, 1988, modificata): 1) copertura neogenica; 2) serbatoio principale carbonatico; 3) faglia di Rapolano Terme; 4) faglia delle Terme di S. Giovanni; 5) acque di origine meteorica; 6) acque profonde; 7) acque con caratteristiche fisico-chimiche intermedie.

11. Esso enuncia l'irreversibilità di molti eventi termodinamici quali, ad esempio, il passaggio di calore da un corpo caldo ad uno freddo senza l'apporto di lavoro esterno. Il dispositivo che compie il “ciclo frigorifero” può essere utilizzato: i) come macchina frigorifera, il cui scopo è di sottrarre calore ad un ambiente freddo e di trasferirlo ad uno caldo (questo effetto è quindi utilizzato nei frigoriferi e nei condizionatori d'aria); ii) come pompa di calore, il cui scopo è fornire calore ad un ambiente caldo, prelevandolo da un ambiente più freddo.

12. La *caloria* (cal) è comunemente definita come l'energia necessaria per innalzare di 1 °C (da 14,5 a 15,5) la temperatura di 1 g di acqua distillata alla pressione di 1 atm. La *frigorificia* (Fr) è l'unità di misura dell'energia usata dai sistemi di raffreddamento e dai condizionatori ed è equivalente alla chilocaloria (1 Fr = 1 kcal), cioè alla quantità di calore che deve essere sottratta da 1 kg d'acqua distillata per abbassarne la temperatura da 15,5 °C a 14,5 °C alla pressione di 1 atm.

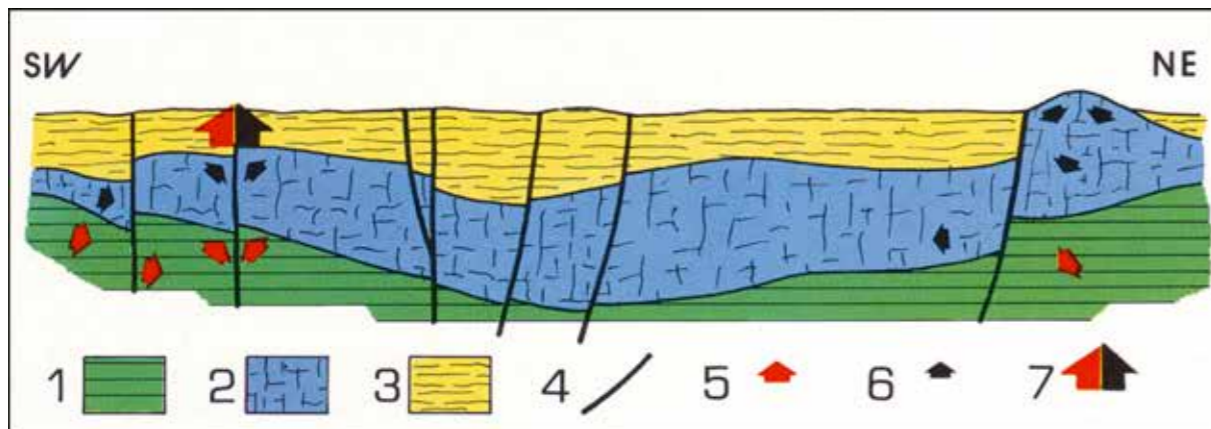


Fig. 9. Schema della situazione strutturale ed idrogeologica del settore nord-orientale del Bacino di Siena (Barazzuoli et al., 1988, ridisegnata): 1) basamento cristallino; 2) serbatoio principale carbonatico; 3) complesso delle formazioni argillose neogeniche e delle formazioni cretaco-mioceniche (copertura); 4) faglie; 5) circolazione di un fluido geotermico a livello del basamento; 6) circolazione di un fluido geotermico a livello del serbatoio principale carbonatico; 7) circolazione risultante dal miscelamento tra i due fluidi precedenti (Sorgente dell'Acqua Borra).

ni sono molto vantaggiose in quanto: 1) hanno una durata di gran lunga superiore a quella degli edifici che le ospitano; 2) costituiscono un unico sistema in grado di fornire riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria; 3) hanno costi di gestione e manutenzione molto bassi; 4) presentano una maggiore efficienza ed economicità rispetto agli impianti tradizionali (Tab. 2).

La corretta progettazione di un impianto geotermico assegna un ruolo fondamentale al geologo il quale, partendo dal fabbisogno energetico dell'immobile, calcola come e quanta energia estrarre dalla fonte fredda per far sì che la pompa di calore riesca a fornire le calorie e frigorifiche necessarie. Il dimensionamento di un campo sonde, soprattutto per la predisposizione di impianti di media ed elevata potenza, prevede l'esecuzione di un *test* finalizzato a determinare le caratteristiche del terreno e le sue proprietà termiche; questo *test*, detto di "risposta geotermica" (*Ground Response Test - GRT*), va effettuato direttamente *in situ* mediante un pozzo di prova munito di sonda geotermica (Foto 10).

Questo *test* consente di calcolare, con buona approssimazione, la conducibilità termica¹³

media del terreno relativa alla lunghezza della sonda (Tab. 3), la resistenza termica riscontrata nel complesso sonda/terreno e la temperatura media del terreno. Tramite questi dati risulta possibile definire l'entità del "serbatoio geotermico" che verrà sfruttato e, quindi, progettare l'impianto; una sonda verticale di 100 metri consente di estrarre, in media, da 2 a 7 kWt.

Gli impianti a bassa entalpia sono comunemente distinti in: *open-loop* e *closed-loop*. I primi prelevano il calore direttamente dall'acqua sotterranea che, nel corso dell'anno, mantiene una temperatura praticamente costante e pari alla temperatura media dell'aria o maggiore nel caso di acquifero profondo. Essi sono costituiti da uno o più pozzi di estrazione dell'acqua di falda da cui si preleva il calore mediante degli scambiatori inseriti nella pompa di calore (Fig. 10); dopo aver completato il proprio scambio e senza aver subito alcuna alterazione chimica, l'acqua può essere usata per altri fini, ma solitamente viene re-immessa nell'acquifero mediante uno o più pozzi situati "a valle" (secondo il flusso della falda) rispetto ai pozzi di estrazione. Attraverso

13. La conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore; nelle unità del Sistema Internazionale, essa è misurata in *watt su metro-kelvin* [W/(m·K)], essendo il *watt* (W) l'unità della potenza, il metro (m) l'unità della lunghezza e il *kelvin* (K) l'unità della temperatura. Il suo inverso è la resistenza termica (m·K/W).

Tabella 2 - Caso reale di sostituzione di impianto da fossile a geotermico con il conseguimento di un significativo risparmio economico, soprattutto dal punto di vista dell'utilizzo (dati forniti dallo Studio Ecogeo).

RISCALDAMENTO INVERNALE		RAFFRESCAMENTO ESTIVO	
Dati gas metano		Dati termopompa	
Potere calorifico d'uso PC _u	8,60 kWh/L	Ore di funzionamento al giorno	12,00 h
Grado di rendimento impianto	0,90 h	Fabbisogno estivo mediante <i>ciller</i>	27.950,00 kWh
Costo del gas metano	0,70 €/m ³	Costo energia elettrica diurna	0,20 €/kWh
Costo del gas metano	0,08 €/kW	Costo annuo raffrescamento estivo	5.590,00 €
Costo annuo gas metano	18.372,52 €	Fabbisogno estivo con <i>freecooling</i>	9.480 kWh
		Costo annuo raffrescamento estivo con <i>freecooling</i>	1.896,00 €
		Coefficiente di prestazione annuo	4,40 m
		Totale superficie appartamenti	3.075,00 m ²
		Costo energia elettrica diurna	0,20 €/kWh
		Costo appartamento con <i>ciller</i>	2,95 €/m ²
		Costo energia elettrica notturna	0,17 €/kWh
		Costo appartamento con <i>freecooling</i>	0,62 €/m ²
		Costo annuo termopompa	8.382,34 €
		Risparmio sui costi con <i>freecooling</i>	79,09 %
		Costo annuo appartamento con caldaia a gas	5,96 €/m ²
		Risparmio annuo	9.945,18 €
		Costo annuo appartamento con termopompa	2,73 €/m ²
		Risparmio sui costi con termopompa	54,26%

la re-immissione della stessa quantità d'acqua estratta si assicura non solo la ricarica dell'acquifero e quindi la sostenibilità della risorsa, ma

si evitano anche fenomeni di subsidenza. I sistemi *open-loop* possono essere realizzati in presenza di un acquifero in grado di fornire una portata

Tabella 3 - Conducibilità termica, potenza di estrazione e lunghezza della sonda geotermica per alcune tipologie di sottosuolo (Gehlin, 1998): COP = coefficiente di prestazione, dato dal rapporto tra il calore immesso (riscaldamento) o estratto (raffrescamento) e il consumo di energia (solitamente elettrica) dell'edificio.

Tipo di sottosuolo	Conducibilità termica [W/(m·K)]	Potenza di estrazione (W/m)	Lunghezza della sonda per kW di potenza di riscaldamento (m)	
			COP = 3	COP = 3,5
Rocce sciolte asciutte	< 1,5	20	33	36
Rocce consolidate o sciolte sature d'acqua	1,5 - 3,0	50	13	14
Rocce consolidate a cond. termica elevata	> 3,0	70	9,5	10
Ghiaia e sabbia asciutte	0,4	< 20	> 33	> 36
Ghiaia e sabbia sature	1,8 - 2,4	55 - 65	10 - 12	11 - 13
Argilla e limo umidi	1,7	30 - 40	17 - 22	18 - 24
Calcare	2,8	45 - 60	11 - 15	12 - 16
Arenaria	2,3	55 - 65	10 - 12	11 - 13
Granito	3,4	55 - 70	9,5 - 12	10 - 13
Basalto	1,7	35 - 55	12 - 19	13 - 20
Gneiss	2,9	60 - 70	9,5 - 11	10 - 16

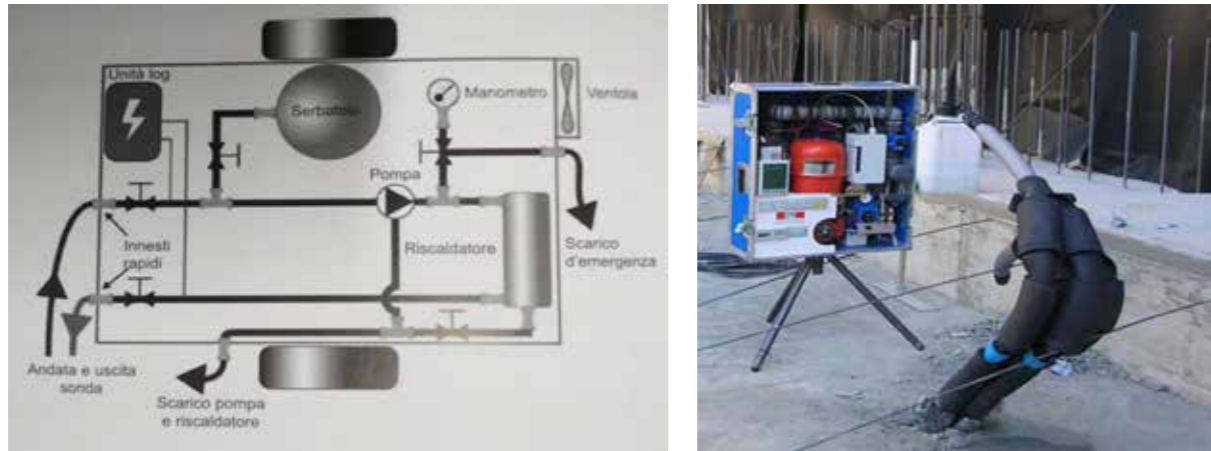


Foto 10. A sinistra, schema del funzionamento e dei componenti interni del macchinario usato per il test di risposta geotermica (Tinti, 2008); a destra, come si presenta il macchinario (foto Studio Ecogeo).

minima costante durante l'anno captando la risorsa possibilmente (per motivi energetici) entro i primi 30-40 m di profondità.

I secondi impianti, più diffusi dei precedenti ed applicabili praticamente ovunque, sono formati da una o più sonde geotermiche le cui estremità apicali convergono dentro un collettore *master* geotermico atto a trasferire l'energia allo scambiatore della pompa di calore (Figg. 11-12).

Esistono varie tipologie di sonde geotermiche (Fig. 13): le più comuni sono quelle verticali a doppia U (Fig. 14), le quali sono disposte con diverse geometrie e distanze reciproche a seconda della conducibilità termica del terreno e sono inserite in numero crescente con l'aumento del fabbisogno energetico del fabbricato. La loro installazio-

ne nel terreno avviene previa perforazione di un pozzo avente esclusiva finalità geotermica (Foto 11); successivamente sono cementate con una miscela di cemento e bentonite, la quale assicura compatibilità ambientale, caratteristiche di resistenza ed una buona conduzione termica [0,6-0,7 W/(m·K)] tra sonda e terreno.

I sistemi a collettori orizzontali sono sicuramente più economici rispetto a quelli con sonde verticali; essi risultano, tuttavia, di gran lunga meno efficienti per il fatto che, essendo posati orizzontalmente a soli 2-3 m dal piano di calpestio, risentono delle fluttuazioni della temperatura superficiale (Foto 12).

Un altro tipo di scambiatore è rappresentato dai pali energetici (Foto 13). Nella fase iniziale della

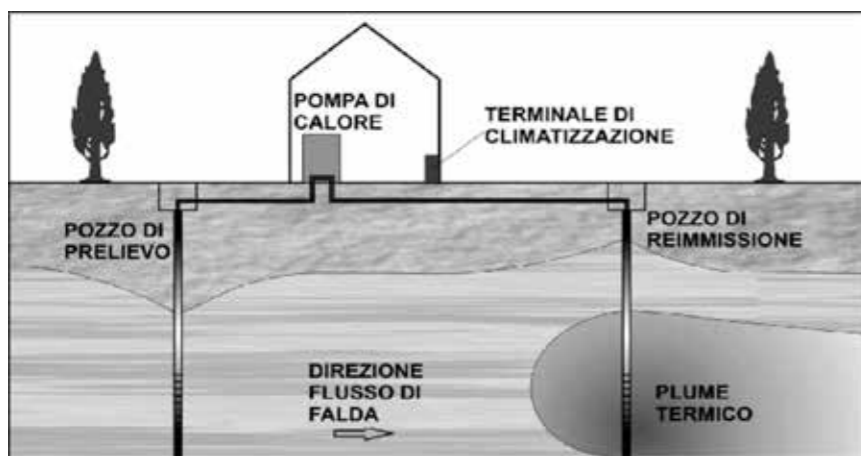


Fig. 10. Schema di un sistema *open-loop* (Tinti, 2008).

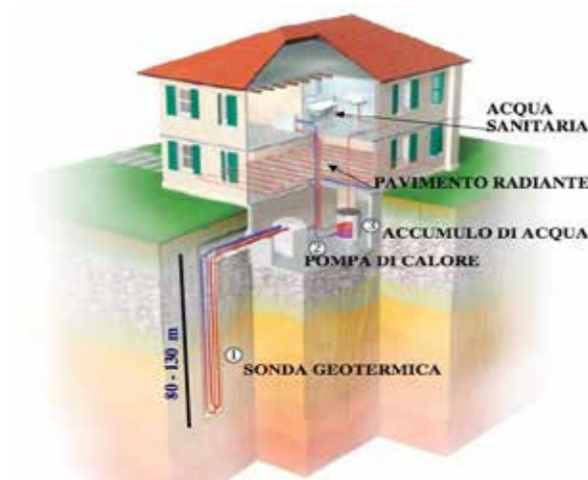


Fig. 11. Funzionamento in modalità riscaldamento di un impianto geotermico a bassa entalpia *closed-loop* con sonde verticali (schema fornito dallo Studio Ecogeo).

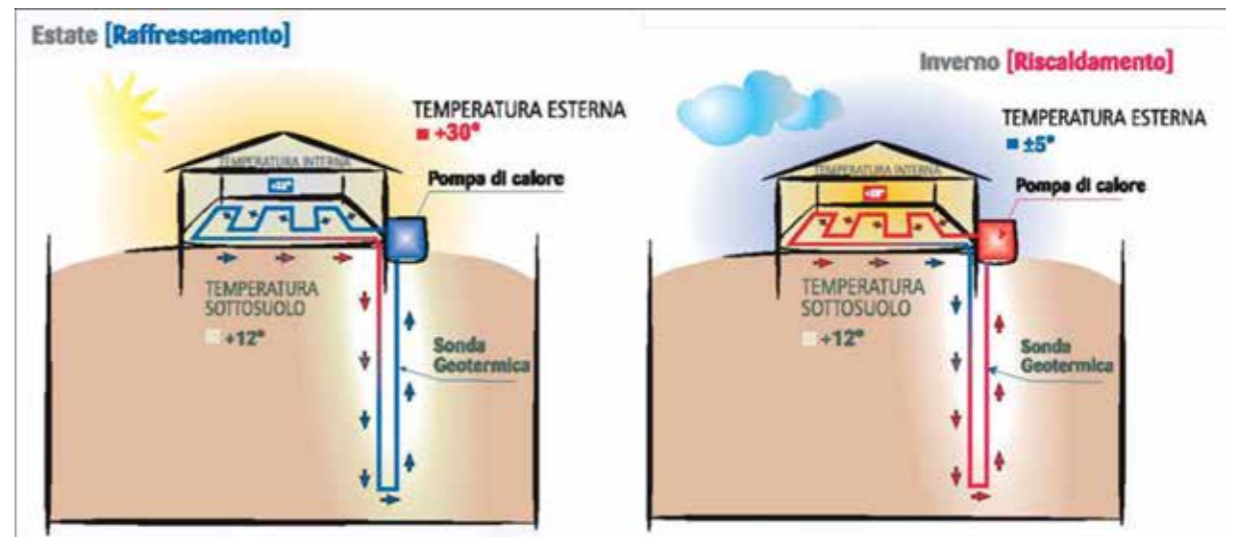


Fig. 12. Sistema *closed-loop* in modalità raffrescamento e riscaldamento (Delmastro & Noce, 2011).

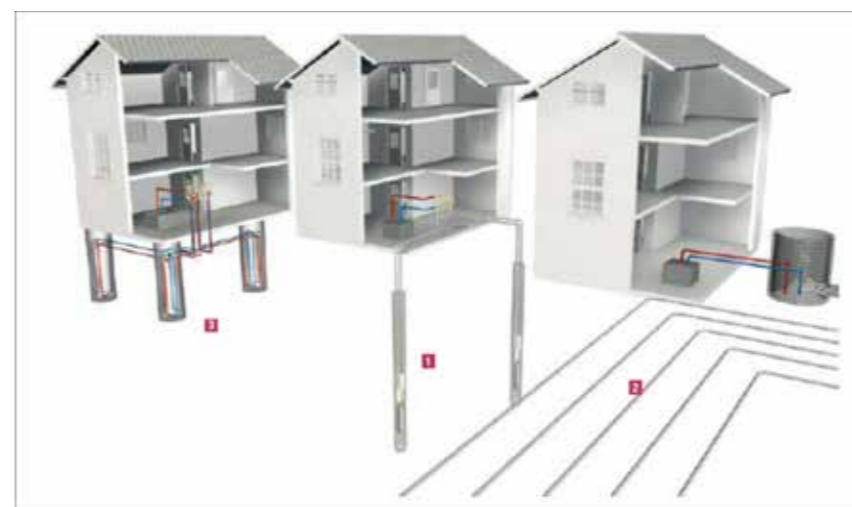


Fig. 13. Sistemi di climatizzazione con varie tipologie di sonde geotermiche: 1 = sonde verticali; 2 = collettori orizzontali infissi nel terreno; 3 = sonde infisse direttamente nelle fondazioni (pali energetici).

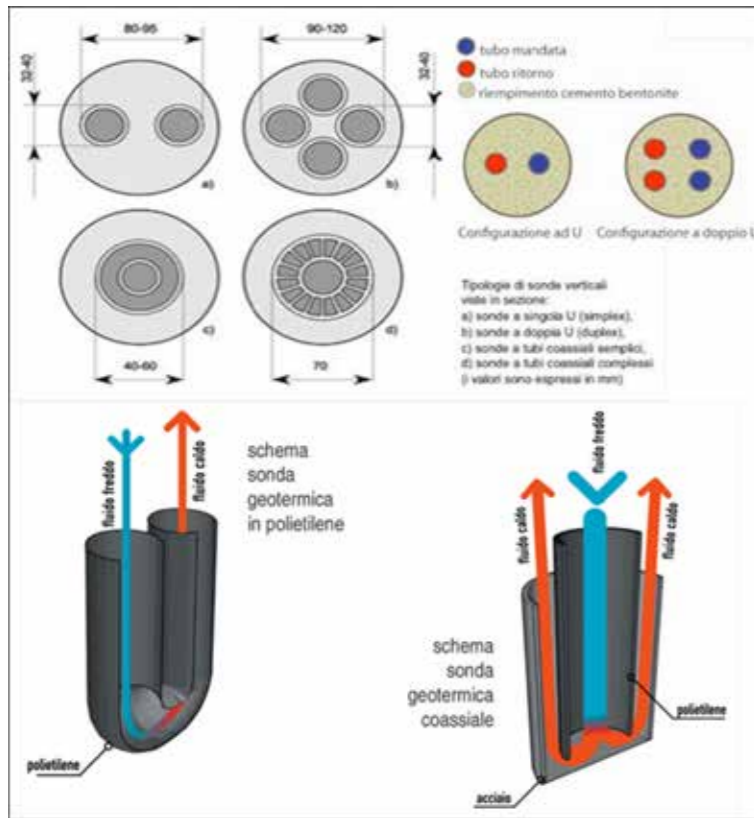


Fig. 14. In alto: a sinistra sono evidenziate le sezioni di pozzi con varie tipologie di sonde verticali; a destra è raffigurato il riempimento dei pozzi. In basso: immagini tridimensionali di una sonda ad U (a sinistra) ed una coassiale.



Foto 11. A sinistra, torre di perforazione per lo scavo del pozzo geotermico; a destra, macchinario che srotola la sonda all'interno del pozzo (foto Studio Ecogeo).

costruzione di un edificio, i collettori sono inseriti direttamente nei pali di fondazione; avendo queste profondità variabile da pochi metri ad alcune decine di metri, è possibile portare un contributo

energetico al fabbricato anche se non paragonabile a quello di una sonda geotermica.

È da sottolineare, infine, che l'attività degli impianti geotermici a bassa entalpia sembra provo-

care nel serbatoio sfruttato la formazione di un *plume* termico (vedi Fig. 10), ma che quest'ultimo si uniforma nel bilancio annuo e si stabilizza nel corso degli anni (Rybach & Eugster, 2002); qualora venga effettuato un corretto dimensionamento, tale tipo di impianti è da considerarsi pertanto sostenibile dal punto di vista ambientale.

Conclusioni

L'energia geotermica costituisce oggi meno dell'1 % della produzione energetica mondiale (IEA, 2007) e fornisce circa il 2 % dell'elettricità e il 5 % del calore per usi diretti rispetto all'insieme delle fonti rinnovabili (Fridleifsson, 2003). Il calore interno del nostro pianeta è enorme, dell'ordine dei $13 \cdot 10^{30}$ J in totale e $5 \cdot 10^{27}$ J nella sola crosta terrestre, ma soltanto una parte di esso può essere sfruttato (Dickson & Fanelli, 2003); sulla base delle stime effettuate da Tester *et al.* (2006) per gli USA, si può ritenere che con le attuali tecnologie sia possibile recuperare ri-

sorse geotermiche tali da soddisfare per almeno 2.000 anni il fabbisogno mondiale di energia primaria, pari a circa 10^{21} J/anno (IEA, 2017), rendendo quindi "inutile" qualsiasi altra fonte non rinnovabile utilizzata.

I maggiori vantaggi in ambito geotermico riguardano la vasta riserva di energia usufruibile nei pressi dei giacimenti, il moderato rendimento energetico netto dei bacini grandi e facilmente sfruttabili, le minori emissioni di anidride carbonica per unità di energia rispetto ai carburanti fossili e, infine, un costo competitivo nella produzione energetica (Tab. 4). I principali svantaggi sono invece costituiti dalla scarsità di giacimenti facilmente accessibili, dalla necessità di una loro accurata amministrazione per evitarne il rapido esaurimento e dal rischio di degrado ambientale dovuto allo sfruttamento. Relativamente allo sfruttamento geotermico sembra opportuno sottolineare come da esso possano derivare livelli medio-alti di inquinamento atmosferico e cambiamenti del clima locale; è altrettanto vero, però, che gli effetti di tali problematiche sono ritenuti dalla comunità scientifica minori rispetto a quelli

Tabella 4 - Costo dell'energia prodotta e costi di impianto per la generazione di elettricità e per gli usi diretti del calore (Fridleifsson, 2001): US¢ = cent USA; US\$ = dollari USA.

Generazione di elettricità	Costo dell'energia	Potenziale costo futuro dell'energia	Costi di impianto chiavi in mano
	(US¢/kWh)	(US¢/kWh)	(US\$/kW)
Biomasse	5 - 15	4 - 10	900 - 3.000
Geotermia	2 - 10	1 - 8	800 - 3.000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1.100 - 1.700
Solare fotovoltaico	25 - 125	5 - 25	5.000 - 10.000
Solare termico	12 - 18	4 - 10	3.000 - 4.000
Maree	8 - 15	8 - 15	1.700 - 2.500
Usi diretti del calore	Costo dell'energia	Potenziale costo futuro dell'energia	Costi di impianto chiavi in mano
	(US¢/kWh)	(US¢/kWh)	(US\$/kW)
Biomasse (compreso etanolo)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
Geotermia	0,5 - 5	0,5 - 5	200 - 2.000
Eolico	5 - 13	3 - 10	1.100 - 1.700
Solare a bassa temperatura	3 - 20	2 - 10	500 - 1.700



Foto 12. Configurazioni dei collettori orizzontali: a doppio meandro (sinistra); a spirale (destra) (foto Oberthal Energy s.r.l.).

causati dall'uso di combustibili fossili o dalle centrali nucleari (Boyle, 2004).

L'Italia è da considerarsi a forte vocazione geotermica ma il suo potenziale può essere valorizzato molto più di quanto fatto finora; si tratta di risorse sostenibili, quasi sempre rinnovabili, compatibili con l'ambiente ed ora economicamente convenienti a tutti i livelli di temperatura. L'aumento della produzione di energia geotermica è dovuto soprattutto al maggior contributo degli usi diretti del calore, che sono cresciuti mediamente dell'8 % all'anno. Purtroppo, è da sottolineare che l'Italia, pur essendo la nazione geologicamente "più calda" d'Europa, figura solo al nono posto riguardo al diretto impiego del calore terrestre ed è ampiamente superata

anche da paesi "più freddi", come Svezia, Germania e Svizzera.

Mettendo insieme le caratteristiche geologiche del territorio italiano ed il tipo di risorse geotermiche disponibili, nonché il probabile aumento del prezzo dei combustibili fossili ed i miglioramenti tecnologici attesi, Cataldi *et al.* (2012) hanno previsto per il 2030: 1) un risparmio di petrolio equivalente pari a $3\text{-}4 \cdot 10^6$ tonnellate/anno; 2) con gli usi diretti della geotermia tale risparmio avrà un'importanza economica simile a quella dell'energia geotermoelettrica; 3) una riduzione della CO_2 emessa pari a $10\text{-}13 \cdot 10^6$ tonnellate/anno; 4) uno sviluppo occupazionale (laureati, tecnici, operai) corrispondente a $100\text{-}200 \cdot 10^3$ nuovi posti di lavoro.



Foto 13. A sinistra, pali energetici su cui sono già stati montati i collettori; a destra, pali energetici messi in posa (foto Rehau).

Testi citati

ARPAT (2014) - *Principali emergenze termali in Toscana: idrogeologia e chimica delle acque*. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, 378 pp.

Banks D. (2012) - *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford (UK), 339 pp.

Barazzuoli P., Costantini A., Grassi S., Lazzarotto A., Micheluccini M., Piantelli F., Salleolini M., Sandrelli F., Squarci P., Taffi L. & Veronesi G. (1988) - *L'energia geotermica in Provincia di Siena: studi e ricerche per l'individuazione e lo sfruttamento non elettrico dei fluidi a medio-bassa temperatura per il territorio comprendente i Comuni di Siena, Castelnuovo Berardenga, Asciano e Rapalano Terme*. Amministrazione Provinciale di Siena - Al.Sa.Ba. Grafiche, Siena, 201 pp.

Barazzuoli P. & Salleolini M. (1993) - *L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione*. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", Pizzi Ed., Milano, 173-246.

Barbagli A., Brogna F.N.A., Callegari I., Guastaldi E., Lioli G., Marsico N., Rezza C. & Trotta M. (2013) - *Approccio multi-isotopico ed idrogeochimico per la caratterizzazione di acque termali: il caso di Saturnia (GR)*. Acque Sotterranee, 25-40.

Battaglia A., Ceccarelli A., Ridolfi A., Frohlich K. & Panichi C. (1992) - *Radium isotopes in geothermal fluids in central Italy*. Proc. Int. Symp. on Isotope Techniques in Water Resources Development, I.A.E.A., 11-15 March 1991, Vienna, 363-383.

Bencini A., Duchi V. & Martini M. (1977) - *Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)*. Chemical Geology, 19: 229-252.

Bertani R. (2005) - *L'energia geotermica*. ANALYSIS, 3: 1-12.

Bertani R. (2016) - *Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report*. Geothermics, 60: 31-43.

Boyle G. (2004) - *Renewable energy*. 2nd Edition, Oxford University Press, UK, 452 pp.

Cataldi R., Grassi W. & Passaleva G. (2012) - *Stato attuale e previsioni di crescita della geotermia in Italia fino al 2030. Il nuovo manifesto della geotermia: una sfida da vincere*. Convegno CNR-SI-GEA-UGI, Roma, 8 giugno 2012, 22 pp.

Chetoni R. (2000) - *Acque minerali e termali. Idrogeologia e opere di captazione. Gestione della risorsa idrica*. Edizioni Geo-Graph, Segrate (Milano), 890 pp.

Conti P., Cei M. & Razzano F. (2016) - *Geothermal energy use, country update for Italy (2010-2015)*. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg (France), 19-24 September 2016.

Delmastro R. & Noce G. (2011) - *Manuale di geotermia a sonde verticali*. Hoepli, 520 pp.

Dickson M.H. & Fanelli M. (2003) - *Geothermal background*. In: "Geothermal energy: utilization and technology", UNESCO, Paris (France), 1-25.

Duchi V., Minissale A., Paolieri M., Prati F. & Valori A. (1992) - *Chemical relationship between discharging fluids in the Siena-Radicofani Graben and the deep fluids produced by the geothermal fields of Mt. Amiata, Torre Alfina and Latera (Central Italy)*. Geothermics, 21(3): 401-413.

Fancelli R. & Nuti S. (1975) - *Studio sulle acque termali e minerali della parte orientale della Provincia di Siena*. Boll. Soc. Geol. It., 94 (1/2), 135-155.

Fanelli M., Bellucci L. & Nachira F. (1982) - *Manifestazioni idrotermali italiane*. CNR-PFE, SPEG, RF 13, Roma.

Fridleifsson I.B. (2001) - *Geothermal energy for the benefit of the people*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5, 299-312.

Fridleifsson I.B. (2003) - *Status of geothermal energy amongst the world's energy sources*. International Geothermal Association, IGA News, 52, 13-14.

Gehlin S. (1998) - *Thermal Response Test, In-Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock*. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering, Luleå (Sweden), 37 pp.

Holm A., Blodgett L., Jennejohn D. & Gawell K. (2010) - *Geothermal Energy: International Market Update*. Geothermal Energy Association, 77 pp.

IEA (2007) - *Renewables in Global Energy Supply*. International Energy Agency Fact Sheet, January 2007, Paris Cedex (France), 34 pp.

IEA (2017) - *Key world energy statistics*. International Energy Agency, September 2017, Paris Cedex (France), 97 pp.

Lund J.W. & Boyd T. (2016) - *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*. Geothermics, 60: 66-93.

Minissale A., Magro G., Vaselli O., Verrucchi C. & Perticone I. (1997) - *Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 79: 223-251.

Panichi C. (1982) - *Aspetti geochimici delle acque termali*. In: Il Graben di Siena, CNR-PFE, SPEG, RF 9, Pisa, 61-72.

Pollack H.N., Hurter S.J. & Johnson J.R. (1993) - *Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set*. Rev. Geophys., 31: 267-280.

Rybach L. & Eugster W.J. (2002) - *Sustainability aspects of geothermal heat pumps*. Proc. 27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford (CA), 50-64.

Tester J.W., Anderson B.J., Batchelor A.S., Blackwell D.D., DiPippo R., Drake E.M., Garnish J., Livesay B., Moore M.C., Nichols K., Petty S., Toksöz M.N. & Veatch R.W. (2006) - *The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MA), 372 pp.

The KamLAND Collaboration (2011) - *Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements*. Nature Geoscience, 4: 647-651.

Tinti F. (2008) - *Geotermia per la climatizzazione: applicazioni, tecnologia, analisi costi-benefici*. Dario Flaccovio Editore s.r.l., Palermo (seconda edizione 2009), 212 pp.

Vaccaro M. (2012) - *Energia geotermica: impianti geotermoelettrici e usi diretti*. Camera di Commercio di Massa Carrara - EAMS, 2 febbraio 2012, 46 pp.

Le acque delle miniere nelle Colline Metallifere

Alessandro Masotti

Viale della Miniera, 55 - 58024 Massa Marittima (GR)
alessandro_masotti@libero.it

Introduzione

Con il toponimo di Colline Metallifere si intende quell'insieme di rilievi, posti grosso modo al centro del triangolo Grosseto - Siena - Piombino, che fanno parte del distretto minerario della Toscana meridionale. Tale distretto ha visto attivi, durante la propria storia iniziata in epoca etrusca, sia le miniere di ferro, rame, argento, stagno, piombo, zinco, pirite, antimonio, mercurio e lignite (prodotto della carbonizzazione del legno) che i campi geotermici. La varietà mineralogica, costituita dai minerali di interesse industriale e dai minerali accessori che li accompagnano in paragenesi, è uno dei fattori che influenzano il chimismo delle acque sotterranee. Altrettanto importante è l'apporto ionico fornito dalle formazioni rocciose attraversate dalle acque circolanti (le unità situate lungo la fascia costiera sono interessate anche dall'acqua marina). A queste anomalie geochimiche naturali si vanno poi ad aggiungere quelle derivanti dalle attività antropiche.

Le miniere, al pari di altre attività di tipo industriale, una volta chiuse necessitano di interventi di messa in sicurezza e bonifica ambientale. In questo ambito capita spesso di dover affrontare il problema delle acque che fuoriescono. Tali effluenti, che costituiscono situazioni di vario tipo e di varia complessità, sono comunque inquadrabili tra gli eventi previsti dalla tecnica mineraria. Pur concentrandosi sugli aspetti minerari, l'articolo cerca anche di offrire ai lettori elementi e spunti per una valutazione sia della qualità delle acque

del sottosuolo, sia dell'impatto ambientale ad esse troppo spesso collegato.

I principali centri minerari delle Colline Metallifere

Il comprensorio delle Colline Metallifere ha avuto quattro centri principali di produzione mineraria: Fenice Capanne, Niccioleta (rispettivamente a sud e a nord di Massa Marittima), Boccheggiano e Gavorrano (Fig. 1). Da queste miniere sono stati estratti negli anni ammassi limonitici e calaminari, calcopirite, galena, blenda e pirite. I corpi minerali si presentavano sotto svariate giaciture, essendo controllati sia da fattori litologici che tettonici; vari sono stati anche i metodi di coltivazione mineraria impiegati per estrarli. Tralasciando la parte storica, cioè quella delle coltivazioni minerarie etrusche e medievali, possiamo affermare che la fase di attività estrattiva più recente ha avuto una durata di circa un secolo, coincidendo grosso modo con tutto il 1900. In maggior dettaglio:

- nella miniera di Fenice Capanne (Foto 1) fu coltivato un campo filoniano di grande interesse. I filoni principali, dallo sviluppo di circa 4,5 chilometri e 1,0 chilometro, furono denominati Fenice-Capanne e Serrabottini; per entrambi la coltivazione riguardò mineralizzazioni a solfuri misti di rame, piombo e zinco (calcopirite, galena con un certo tenore di argento e blenda). L'attività della miniera iniziò nel 1880 e cessò nel 1985;

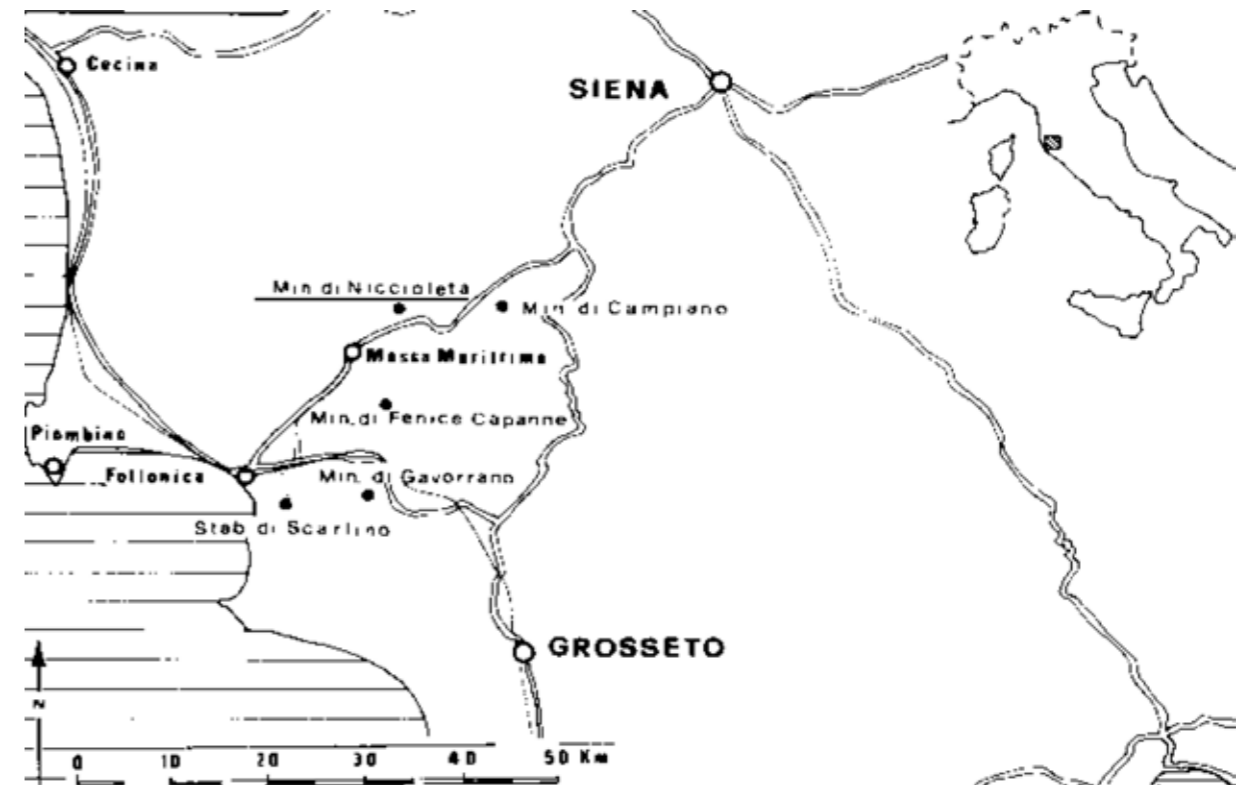


Fig. 1. Ubicazione dei centri minerari delle Colline Metallifere trattati nel testo.



Foto 1. Miniera di Fenice Capanne. Pozzo Carlo e impianti minerari intorno alla metà del '900.



Foto 2. Miniera di Niccioleta. Pozzo Rostan e impianti minerari (anni 1960-1970 circa).

- la miniera di Niccioleta (Foto 2) comprendeva i cantieri di Valdaspra e di Niccioleta; nei primi, furono coltivate mineralizzazioni a idrossidi e talora ossidi di ferro (goethite, limonite, ematite) al contatto Calcarea cavernoso - flysch ligure, nei secondi furono coltivati corpi a pirite mas-

siva (con subordinata magnetite e scarsa pirrotina) sia al contatto fra il Calcarea cavernoso e le filladi del basamento, sia nelle filladi stesse in corrispondenza di livelli "evaporitici" (anidrite

e dolomia). Possiamo assumere come anno d'inizio dei lavori estrattivi il 1905; la chiusura avvenne nel 1992.

- la zona di Boccheggiano ha avuto una storia mineraria piuttosto articolata. La miniera di rame, denominata Merse, iniziò nel 1888 con lo sfruttamento di un grande filone in ganga quarzosa posto lungo la Faglia di Boccheggiano e mineralizzato a pirite e calcopirite (con tracce di galena, blenda, tetraedrite argentifera); i lavori durarono fino al 1910, per essere poi ripresi negli anni '50 al fine di recuperare la pirite lasciata in posto nella prima fase. Successivamente le coltivazioni interessarono mineralizzazioni lentiformi a pirite, al contatto fra il Calcarea cavernoso e le filladi del basamento, in una serie di cantieri minerari disposti all'incirca in direzione nord-sud e denominati: Rigagnolo, Valle Buia, Molognoni, Botroni, Baciolo, Ballarino (Foto 3). L'attività del settore cessò nel 1975 ma proseguì in una nuova e moderna struttura poco distante: la miniera di Campiano (Foto 4). In quest'ultima fu coltivato il corpo minerario a pirite (con subordinate magnetite, pirrotina e locali concentrazioni di blenda, galena, calcopirite) situato nella parte profonda della Faglia di Boccheggiano. I lavori di scavo preparatorio cominciarono nel 1974, mentre la produzione proseguì dal 1983 al 1994; la chiusura definitiva avvenne nel 1996.



Foto 4. Miniera di Campiano. Il Pozzo 1 (a sinistra), il Pozzo 2 e parte degli impianti esterni.

- nella miniera di Gavorrano (Foto 5) furono coltivati fin dal 1898 diversi corpi minerali a pirite molto prevalente (localmente detti "masse", la più importante fu la Massa Boccheggiano), con tracce di magnetite e pirrotina e rari solfuri misti di rame, piombo e zinco, localizzati essenzialmente lungo la zona di contatto fra un plutone quarzo-zononitico ed il Calcarea cavernoso. I principali cantieri produttivi erano quelli di Gavorrano, Rigoloccio e Ravi. La produzione cessò nel 1982.

Le acque sotterranee

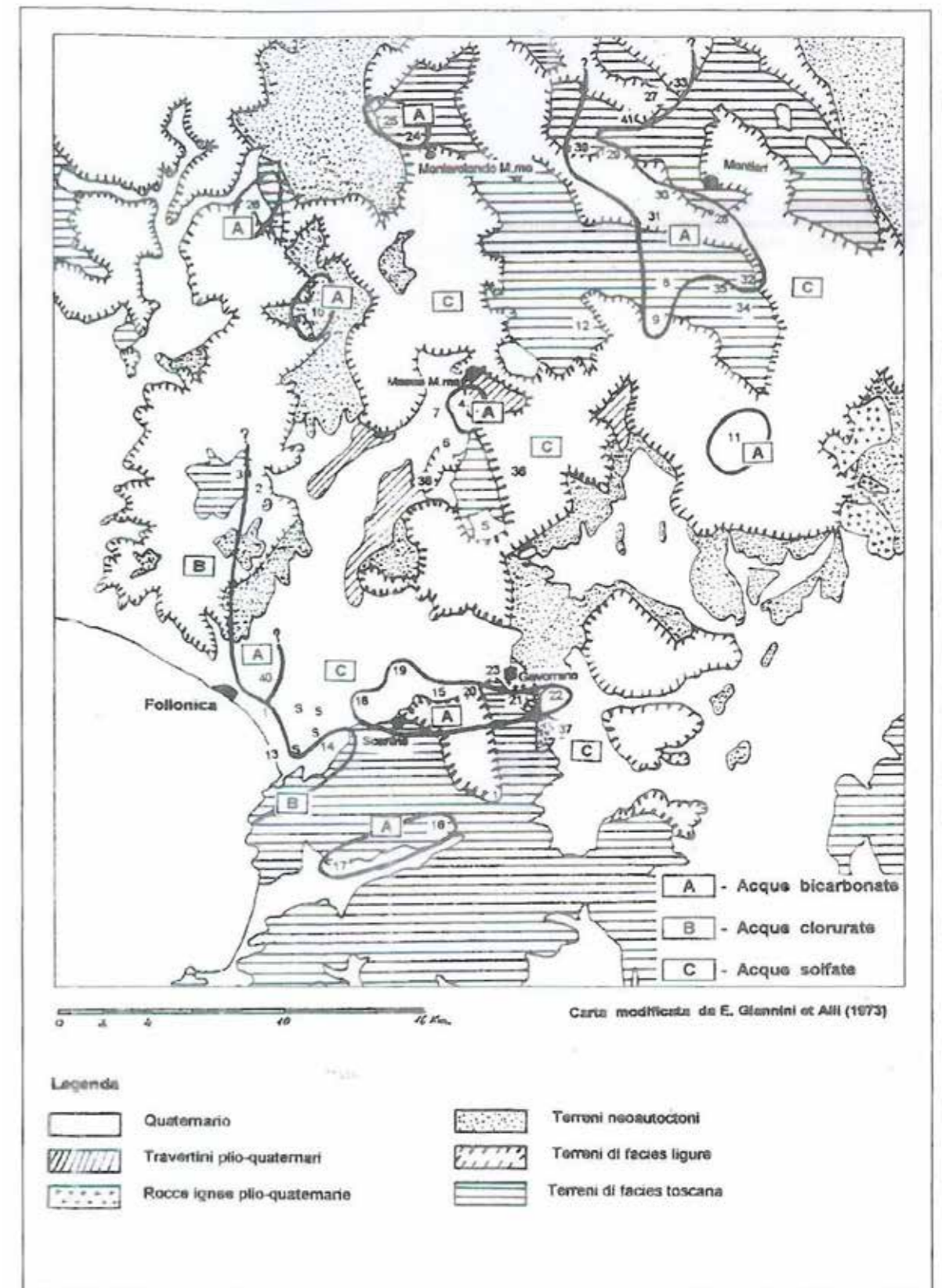
Le acque sotterranee delle Colline Metallifere appartengono a tre famiglie chimiche



Foto 3. Miniera di Boccheggiano. Cantiere Ballarino (anni '60 del secolo scorso).



Foto 5. La miniera di Gavorrano con il Pozzo Roma e alcuni resti degli impianti esterni. A sinistra la sede del Parco delle Colline Metallifere; a destra, in alto, il Teatro delle Rocce.



(Fig. 2), ciascuna delle quali comprendente due gruppi:

- acque solfate, suddivisibili in magnesiache e calciche;
- acque clorurate, suddivisibili in bicarbonate e solfate;
- acque bicarbonate, suddivisibili in clorurate e solfate.

Fra le acque solfate, che sono le più diffuse non solo nel territorio considerato ma anche nelle aree minerarie, le solfato - magnesiache esprimono con probabilità una risalita dalle Filladi di Boccheggiano (cioè dalle rocce del basamento), mentre le solfato - calciche denotano un possibile lungo contatto con il Calcere cavernoso. Le aree minerarie di Fenice Capanne, Niccioleta, Campiano s. s. e Gavorrano, sono caratterizzate da acque solfato - magnesiache e solfato - calciche; le prime sono da ritenere acque solfate "madri" a Campiano, Niccioleta e Gavorrano, le seconde a Fenice Capanne. Le acque clorurate si distribuiscono, oltre che nella fascia costiera, lungo una striscia che va da Montioni (Comuni di Follonica e Suvereto) alla zona di Meleta - Botrona (Comune di Scarlino). I dati analitici indicano una probabile origine profonda per la maggior parte dei casi. Le acque bicarbonate seguono in genere le aree di affioramento dei termini calcarei della serie toscana; anche se ricevono un grosso contributo dall'infiltrazione superficiale, si riscontrano situazioni in cui è verificabile un apporto di acque profonde (ad esempio, a Monterotondo Marittimo nei calcari profondi è presente un circuito idrotermale).

Le acque delle Colline Metallifere, e segnatamente quelle delle aree minerarie, non possono non risentire delle forti anomalie geochimiche che sussistono in modo naturale; l'attività lavorativa ha inoltre potenziato nel tempo la loro interazione con i vari minerali. Di conseguenza, il ritrovamento di metalli nelle acque e nei suoli è da inquadrarsi schematicamente nell'ambito delle seguenti situazioni:

- *mineralizzazioni allo stato naturale.* La Toscana è considerata, a buon titolo, una delle regioni

minerarie più importanti d'Italia. Da rilevare, però, che è la sua parte meridionale a offrire le mineralizzazioni più significative dal punto di vista sia qualitativo che quantitativo. Senza entrare in dettagli giacimentologici, che non riguardano l'articolo, possiamo definire le mineralizzazioni della Toscana meridionale come il prodotto evolutivo di processi regolati sia da fattori litologici, stratigrafici e strutturali, sia da fenomeni magmatici recenti (in senso geologico). Tale concomitanza di agenti genetici, che nel caso dei giacimenti metalliferi sono definiti "metallotecti", ha dato luogo ad una situazione difficilmente riscontrabile in altre aree dell'Italia e del mondo.

I giacimenti minerari, che si possono formare attraverso le più svariate dinamiche e si possono presentare sotto molteplici forme, hanno in comune il fatto di costituire concentrazioni anomale di elementi chimici, altrimenti presenti in modo più o meno "disperso" in seno alla crosta terrestre. Le concentrazioni si formano il più delle volte in ambiente crustale, anche se possono presentare propaggini che arrivano alla superficie esterna o possono affiorare per altre cause (ad esempio per erosione). Un corpo minerario interagisce quindi con l'ambiente circostante, subaereo e sotterraneo e, al pari delle normali formazioni rocciose, è soggetto a fenomeni di erosione, dissoluzione, trasporto, sedimentazione, precipitazione, trasformazione. In pratica, sotto l'azione degli agenti esogeni, ma non solo, il giacimento si disgrega e si disperde sia nel suolo, sia nelle falde idriche superficiali e profonde. Il dilavamento degli affioramenti mineralizzati a solfuri da parte delle acque superficiali da luogo ad un drenaggio acido indicato con l'acronimo ARD (Acid Rock Drainage). Questa caratteristica primaria ha senz'altro caratterizzato, e continua a caratterizzare la regione, da prima che l'azione dell'uomo venisse a sommarsi a quella degli agenti naturali;

- *attività mineraria in epoca antica.* Nel corso dei secoli, partendo dagli affioramenti mineralizzati visibili, numerose generazioni di minatori han-

no portato in superficie minerali interferendo con i processi geomorfici in atto. È impossibile stabilire quanto ciò abbia inciso sui processi naturali sommandosi ad essi, anche perché molte testimonianze dei lavori minerari non sono più osservabili in quanto in gran parte "rinaturalizzate". Risulta inoltre difficoltoso conoscere la localizzazione dei vecchi lavori minerari e, conseguentemente, stimare a quanto ammonti il loro apporto in termini di liberazione nell'ambiente di minerali e di metalli;

- *attività mineraria in epoca moderna.* Durante quasi tutto il secolo scorso il polo minerario delle Colline Metallifere ha inciso significativamente sul paesaggio e sull'ambiente circostante, contribuendo alla messa in circolazione di sostanze minerali e di metalli. Resti dell'attività svolta sono presenti sul territorio sotto forma di imbocchi di gallerie e di pozzi, aree industriali, discariche di sterili di coltivazione, ex bacini di decantazione degli sterili di arricchimento, gallerie di drenaggio, cumuli di scorie, ecc.. Da anni sono in corso studi e progetti finalizzati alla loro messa in sicurezza ed alla bonifica ambientale. In alcuni casi gli interventi sul territorio sono già stati eseguiti, in altri sono

in corso di esecuzione, in altri ancora i progetti sono stati già approvati o stanno percorrendo l'iter approvativo.

LE GALLERIE DI DRENAGGIO

Tutte le miniere considerate hanno presentato (e in parte presentano) problematiche legate all'acqua, in quanto il lavoro in sotterraneo ha da sempre dovuto far fronte all'esistenza di falde idriche che ne hanno ostacolato il procedere. In epoca antica il giacimento minerario, dopo gli scavi superficiali, veniva raggiunto con pozzetti verticali; data la mancanza di mezzi di eduazione adeguati, trovare acqua in abbondanza coincideva quasi sempre con l'abbandono del cantiere di coltivazione o addirittura dell'intera miniera. Dopo la rivoluzione industriale, la messa a punto di efficaci sistemi di pompaggio consentì di approfondire i lavori sotterranei fronteggiando efficacemente le venute d'acqua. Questo permise la realizzazione di miniere che si sviluppavano molto al di sotto del livello idrostatico (talvolta anche al di sotto del livello del mare) e che venivano tenute asciutte tramite stazioni di pompaggio. Una soluzione efficace ed esaustiva

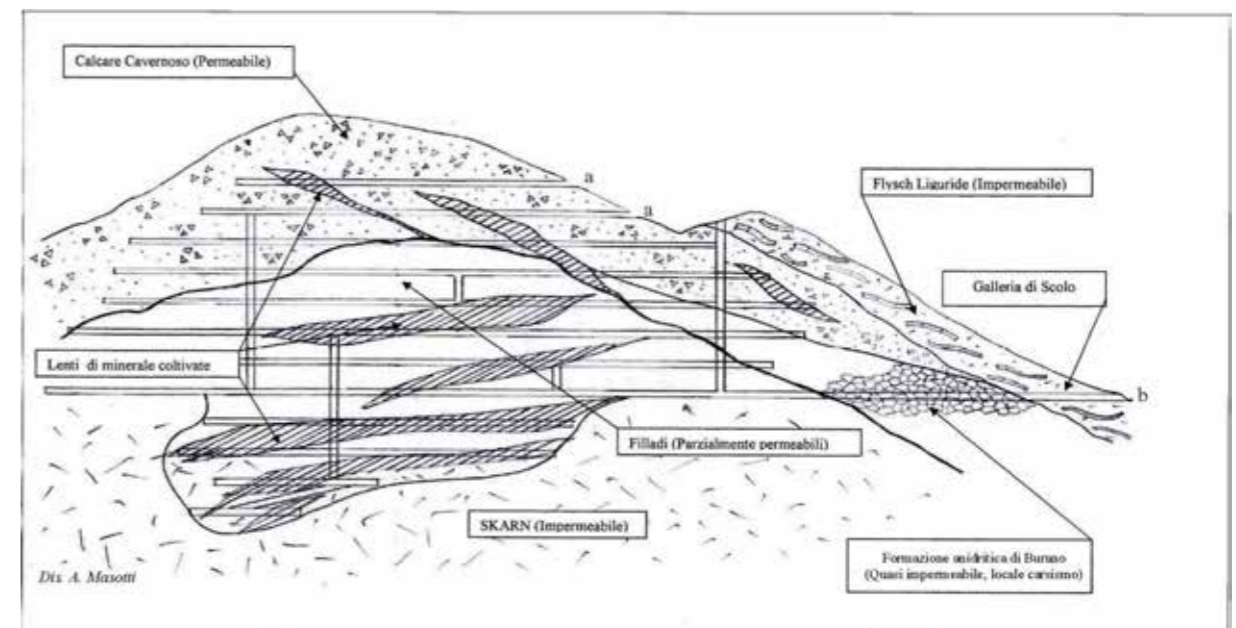


Fig. 3. Sezione geomineraria schematica (esempio di Niccioleta).

per la raccolta ed evacuazione delle acque era ed è ancora quella delle gallerie di drenaggio o di scolo. La scelta tecnica è quella di ottenere un ambiente drenato sfruttando la gravità, cioè facendo confluire tutte le venute d'acqua nella parte bassa della miniera e evacuandole per mezzo della galleria di scolo, la quale dovrà avere una pendenza verso lo sbocco esterno e trovarsi a quote superiori al livello del mare. In questo contesto la logistica riveste una particolare importanza. Una miniera realizzata in ambiente montuoso presenta, infatti, problemi molto diversi rispetto ad una realizzata in zone a morfologia collinare o pianeggiante. Ad esempio, quando gli imbocchi si affacciano sui fianchi di una valle (Fig. 3, punto a) la miniera non ha bisogno di gallerie di drenaggio o di impianti particolari di eduazione, almeno fino a quando tali imbocchi si mantengono al di sopra della quota di fondovalle; in questo caso è sufficiente scavare le gallerie leggermente in salita (può bastare una pendenza del 2-3/1000) per far sì che le acque intercettate durante gli scavi defluiscano verso l'esterno. Nell'area delle Colline Metallifere tale situazione è stata riscontrata solo nella fase iniziale delle coltivazioni minerarie perché l'approfondimento dei lavori ha sempre posto il problema della presenza delle acque e della loro fuoriuscita tramite la realizzazione di gallerie di scolo (Fig. 3, punto b).

I poli minerari trattati nell'articolo sono dotati di gallerie di scolo perfettamente efficienti che

convogliano all'esterno le acque delle miniere sia in modo naturale, per risalita della falda acquifera, sia in modo provocato cioè tramite stazioni di pompaggio. In particolare:

- *miniera di Fenice Capanne*. La miniera di Fenice Capanne fu dotata di una galleria di scolo per poter abbassare il livello idrostatico e consentire l'approfondimento dei lavori di coltivazione. L'opera, che fu realizzata fra il 1895 ed il 1905, collega la miniera con la località Forni dell'Accesa, con uno sviluppo di oltre quattro chilometri: le acque, indirizzate verso il tratto iniziale del Fiume Bruna (sponda sinistra), prima dell'immissione sono intercettate da un acquedotto che le convoglia verso lo stabilimento di Scarlino;
- *miniera di Niccioleta*. Per fare fronte a problemi di venute d'acqua la Società Concessionaria progettò nel 1936 una galleria di scolo che partiva dalla località Perolla e arrivava fino all'estremo nord della miniera, per un totale di oltre km 6. I lavori furono terminati nel 1939. Tale galleria educa all'esterno le acque delle sorgenti interne sversandole in coincidenza della sponda destra del Torrente Carsia (Foto 6);
- *miniera di Boccheggiano*. Nel 1951 fu iniziato lo scavo di una grande galleria di scolo che aveva la funzione di abbassare il livello idrostatico in miniera per consentire la prosecuzione dei lavori di coltivazione. Lo scavo terminò nel 1956. La galleria ha una lunghezza totale di quasi undici

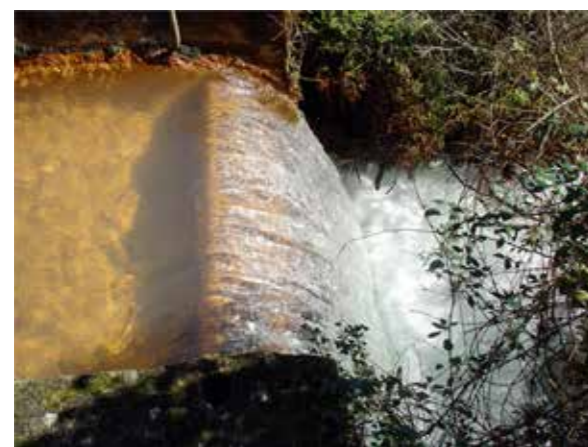


Foto 6. Acqua in uscita dalla galleria di scolo di Niccioleta.



Foto 7. Acqua in uscita dalla galleria di scolo di Boccheggiano.

chilometri e sbocca nel Torrente Carsia (sponda sinistra) in località Perolla, alcuni chilometri più a valle di quella di Niccioleta (Foto 7);

- *miniera Merse*. Essa era dotata di una galleria di scolo a q 418 m s.l.m., attualmente murata, che scaricava le acque nel Fiume Merse;
- *miniera di Campiano*. Per motivi di morfologia e di quote altimetriche essa non poté essere dotata di una galleria di scolo. Nel 1996, dopo la fermata definitiva dei lavori e quindi anche del pompaggio, le acque intercettate all'interno la allagano completamente, risalirono fino all'imbocco della rampa di accesso (a quota +410 s.l.m.) e dall'aprile del 2001 iniziarono a fuoriuscire attraverso una canaletta che era stata predisposta all'atto della chiusura muraria dell'ingresso. Da quella data la rampa di accesso svolge in pratica la funzione di una galleria di scolo. Visto che i parametri chimici delle acque non rispettano le normative vigenti, è in funzione un impianto di trattamento, posto a breve distanza dal punto di uscita, che le depura prima dell'immissione nel Fosso Ribudelli e da questo nel Fiume Merse;
- *miniera di Gavorrano*. Per migliorare la fuoriuscita delle acque intercettate nel sottosuolo, in località San Giovanni presso la frazione Filare fu iniziato nel 1951, e terminato nel 1953, lo scavo di una galleria di scolo della lunghezza di 1700 m che raggiunge i cantieri della miniera. Le acque provenienti dai livelli più profondi venivano convogliate, tramite le pompe del sistema di eduazione principale, in questa galleria per essere portate all'esterno. Attualmente il circuito si basa su due impianti di pompaggio installati su pozzi.

Per il loro quantitativo totale (stimabile a seconda del periodo fra 30.000 e 50.000 metri cubi/giorno), oltre che per il loro contenuto ionico rientrante quasi del tutto nei valori limite previsti dalla legge per le immissioni in alveo, le acque che fuoriescono dalle miniere attraverso le gallerie di scolo potrebbero rappresentare una risorsa per il territorio. I superamenti di tali valori riguardano sostanzialmente il ferro, il manganese e i solfati, ma solo questi ultimi si rinvengono sempre in quantità superiore al tenore limite (1000 mg/l).

Il problema posto dalla quantità dei solfati (in molte acque campionate nella zona delle Colline Metallifere i valori di SO_4^{--} eccedono i 20 meq/l ovvero i 1000 mg/l), comunque, non risiede nella loro pericolosità quanto nella complessità e onerosità dei trattamenti di depurazione per abatterli (i filtri a carbonio, gli addolcitori per acqua ed i filtri a sedimentazione non li eliminano per cui necessitano l'osmosi inversa, la distillazione o lo scambio ionico). Da rilevare, inoltre, che la componente solfatica può trovarsi in quantità ragguardevole anche in acque sorgive che nulla hanno a che vedere con l'attività mineraria. Ad esempio, confrontando il valore dei solfati delle acque in uscita dalla galleria di scolo di Niccioleta (meq/l 24,484) con quelli delle sorgenti naturali della zona Venelle, Aronna e Accesa si evidenzia una totale uniformità, essendo tutti i valori intorno a meq/l 24 (Rivista *Geologia Tecnica e Ambientale*. 1995 e 1997).

Discorso diverso è quello relativo alle acque acide di miniera (Acid Mine Drainage, AMD). Si tratta di un problema comune a molte miniere di solfuri e di carbone (per la presenza di pirite), sia attive che chiuse, studiato in tutto il mondo. In pratica, la pirite e gli altri solfuri esposti ad un ambiente acquoso in presenza di ossigeno e di batteri ossidanti come il *Thiobacillus ferrooxidans*, producono soluzioni fortemente acide (pH 2-3) contenenti una notevole quantità di metalli disciolti e solfati. Tali tipi di effluenti sono il prodotto della lisciviazione di mineralizzazioni che si trovano nella cosiddetta "zona di ossidazione" di un giacimento minerario (cioè nella porzione corticale interessata da circolazione di acque essenzialmente meteoriche). Il caso tipico è costituito dalla miniera Merse dove fu coltivato il filone cuprifero di Boccheggiano, una mineralizzazione a calcopirite, con pirite e accessori, in ganga quarzosa. Lì il fenomeno era così evidente che anche durante l'esercizio della miniera le acque di percolazione, con pH acido e ricche in ioni di rame per avere dilavato zone mineralizzate poste a quote superiori, attaccavano i binari presenti nelle gallerie di carreggio operando una sostituzione elettrolitica che

trasformava il ferro in “metallina” di rame. Queste acque, ancora presenti, fuoriescono miscelate con quelle profonde intercettate dalla miniera di Campiano. Durante l'attività di quest'ultima le acque venivano edotte separatamente, fatte decantare in vasche comuni e poi depurate per mezzo di un impianto automatico basato sull'uso di calce e successivo trattamento con acido cloridrico che portava il pH degli effluenti alla neutralità. L'immissione in acque superficiali (Fosso Ribudelli) era conforme ai requisiti di legge. L'interruzione dei lavori, e quindi anche del pompaggio, causò il previsto e calcolato allagamento dei sotterranei. Le acque di quota + 38 m e quelle di altre piccole venute captate nei vari cantieri (significativa quella del sottolivello -212 m per la temperatura di 72°C), miscelate con quelle che provenivano dai soprastanti cantieri Merse, risalirono lungo la rampa della miniera fino a sortire dall'ingresso posto sul piazzale Ribudelli (a quota +410 m) attraverso una canaletta all'uopo predisposta (Fig. 5). Il pH di questa miscela è intorno a 4,5. Come già detto, sul piazzale è in funzione un impianto di depurazione basato sull'utilizzo di soda che tratta tutta l'acqua in uscita.

IL TERMALISMO

Le acque solfate delle Colline Metallifere sono caratterizzate da una spiccata anomalia termica. Ciò è testimoniato anche dall'esistenza di importanti sorgenti termali che, in alcuni casi, sono state intercettate dai lavori minerari sotterranei. Anche se non è l'unico, il modello idrodinamico degli acquiferi più ricorrente è quello fornito da un massiccio carbonatico con sorgente termale alle pendici (si registra a Gavorrano, Campiglia Marittima e Roselle); questo modello dovrebbe essersi articolato nelle seguenti fasi:

- 1 assorbimento di acqua meteorica da parte di formazioni in genere carbonatiche, alto o medio permeabili, affioranti a 300-400 m sul livello del mare;
- 2 trasmissione delle acque in profondità attraverso linee di discontinuità tettonica e/o circuiti

carsici. L'approfondimento dovrebbe essere tale da interessare, oltre alle formazioni carbonatiche mesozoiche, anche il Verrucano e, se presenti, le Filladi di Boccheggiano;

- 3 riscaldamento causato dal gradiente geotermico (aumento della temperatura man mano che ci si approfondisce nella crosta terrestre) anomalo (il suo valore medio è di circa 1°C ogni 33 metri), che in alcune zone raggiunge livelli elevati (nella miniera di Campiano è pari a 1°C ogni 9-10 m) o addirittura molto elevati (nella zona di Larderello-Travale può arrivare a 1°C ogni 3 m). La risalita sembra guidata da lineazioni tettoniche distensive, come le faglie dirette a direzione prevalente NW-SE che delimitano gli *horst* e i *graben* originati dalla tettonica post-orogena. Il processo viene enfatizzato quando la tettonica mette in contatto formazioni trasmissive con formazioni che generano soglie di permeabilità;

- 4 emergenza in aree situate a quote tali da essere sufficiente il gradiente piezometrico a provocare la fuoriuscita dell'acqua.

Delle quattro grandi miniere delle Colline Metallifere almeno due (Gavorrano e Merse/Campiano) hanno intercettato importanti venute di acque termali, anche se in contesti idrogeologici diversi:

- *miniera di Gavorrano*. Prima che i lavori minerari intercettassero acque calde, in località Bagno di Gavorrano, intorno a quota +36 m s.l.m., scaturiva una sorgente di acqua termale ed era in attività una piccola spa frequentata dalla popolazione locale (Foto 8, 9). Nel 1931 Bernardino Lotti scriveva: “*Ai piedi del monte granitico su cui è fabbricato l'antico castello di Gavorrano, dalla pianura che stendesi verso NO scaturisce la sorgente termale solfatica del Bagno di Gavorrano in Provincia di Grosseto, conosciuta anche sotto il nome di Bagno di Nerone perché la tradizione locale lo riferisce ai tempi di questo imperatore. Il dott. P. Scarafia dell'Istituto tecnico di Arezzo che fece lo studio chimico-fisico delle sue acque, dice infatti che queste dovettero godere d'una certa fama anche presso gli antichi romani perché durante i lavori recenti di rico-*

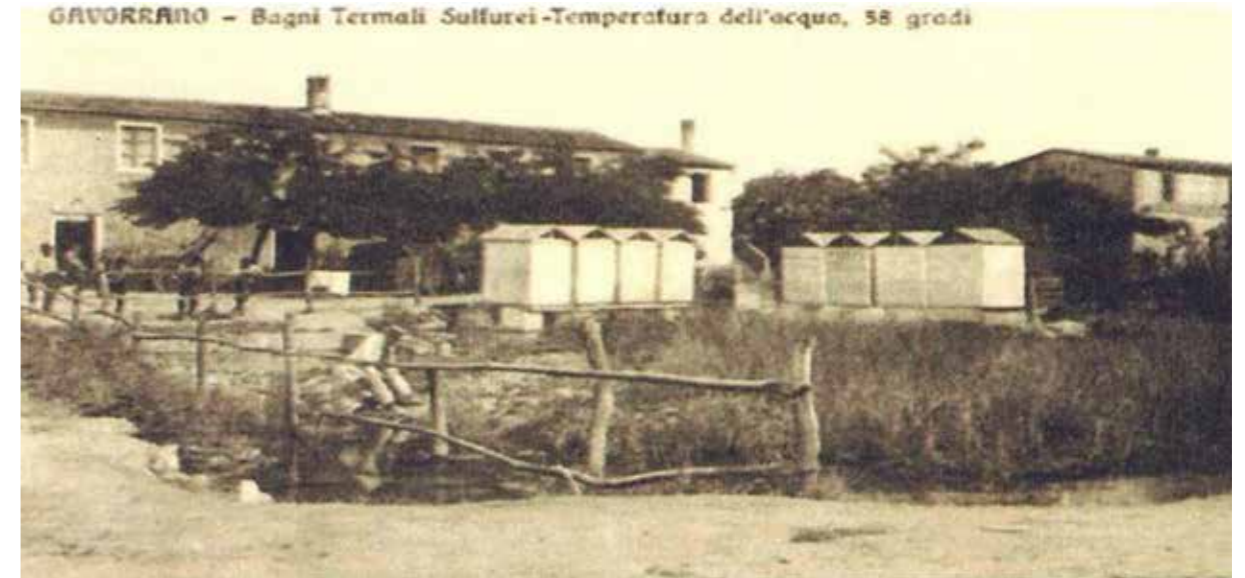


Foto 8. Stabilimento termale in località Bagno di Gavorrano agli inizi del '900.

struzione del bagno, vi si trovarono avanzi di muri d'un bagno antico probabilmente dell'epoca romana ... (omissis) ... L'insieme della sorgente è formato da numerose polle che scaturiscono dal fondo di un piccolo lago, quasi rettangolare, largo 15, lungo 21 metri e della profondità di 80 centimetri. La sua portata è di circa 80 litri al 1" e sembra non subire variazioni notevoli, come invariata rimane la temperatura di 34,1°C dell'acqua. Come in

tutte le acque termali della Maremma Grossetana vive in questa la Melanopsis Dufouri Ferruss."

Seguendo il modello precedentemente esposto, le acque meteoriche si infiltrano attraverso il complesso carbonatico mesozoico del Monte Calvo (che funge da roccia serbatoio) per percolare nelle sottostanti evaporiti triassiche; a Gavorrano affiora



Foto 9. Interno dello stabilimento termale intorno al 1930.

inoltre, con contatto per faglia, un plutone quarzomonzonitico (il cosiddetto “granito”). Ovviamente, il riscaldamento delle acque è funzione della profondità raggiunta e del gradiente geotermico locale, che in base a studi effettuati risulta di circa 7,5°C/100 m. Con l’approfondimento dei lavori minerari l’acqua termale iniziò ad essere captata in miniera e, contestualmente, iniziò a diminuire alla sorgente finché, nel 1957, la scaturigine si prosciugò definitivamente. L’acqua ha continuato ad essere captata nei sotterranei della miniera e, miscelata con altre venute interne, pompata all’esterno dagli impianti di eduazione sia durante l’attività mineraria che in tempi successivi (l’operazione è ancora in corso). Come descritta, la situazione può apparire semplice e verrebbe spontaneo pensare di riutilizzare questa acqua ai fini termali. In realtà essa costituisce un problema idrogeologico e minerario di grande rilevanza e con molteplici variabili, tanto che da decenni è oggetto di studi e di interventi;

- miniere Merse e Campiano. Si tratta di due miniere diverse non solo per il minerale estratto ma anche per l’epoca in cui sono state attive e per le quote altimetriche interessate; la prima è abbastanza superficiale, l’altra è molto profonda (una delle più profonde d’Italia). Quello che le accomuna è che sono entrambe poste lungo la Faglia di Boccheggiano e si trovano una sopra l’altra (Fig. 4). La Faglia di Boccheggiano è una importante dislocazione distensiva regionale (si segue in superficie per oltre 10 Km) con direzione nella zona della miniera intorno a nord-ovest/sud-est, immersione orientale di circa 42°- 45° ed un rigetto verticale stimabile intorno al chilometro. Nei primi anni del 1900 venivano segnalati nella miniera Merse, due circuiti idraulici: uno con acque fredde di infiltrazione superficiale e uno con acque calde (temperatura di 43°C) risalenti da fratture nelle filladi “di letto” (fonte: Corpo delle Miniere) e dotato di un notevole battente idraulico. Nel gennaio del 1977 la miniera di Campiano (in preparazione) intercettò acqua termale a quota +38 m s.l.m., dove la rampa camionabile in scavo attraversava da “tetto” a “letto” la Faglia di Boccheggiano (Figg. 4, 5). Tale venuta, uscita con elevata temperatura

(oltre 50°C) e forte pressione da un foro da mina, allagò la miniera e contemporaneamente svuotò la soprastante miniera Merse che dopo la chiusura si era riempita di acqua. La captazione a quota +38 prosciugò anche la sorgente denominata “Acqua Calda” situata due chilometri a SSE. Gli studi idrogeologici evidenziarono un circuito idraulico complesso, il cui vettore principale coincideva con la shearing zone della Faglia di Boccheggiano e di altri disturbi minori; un contributo al circuito era fornito anche dal banco evaporitico intercalato nella formazione filladica e dalla miniera Merse. Negli anni 1983-84 questo percorso fu in parte “cortocircuitato” collegando idraulicamente le due miniere al livello +300 m s.l.m. tramite una galleria in “traverso banco” ed alcuni sondaggi di drenaggio. Il collegamento fu eseguito perché la miniera Merse, che nel frattempo si era di nuovo allagata, tornasse asciutta per non rappresentare un pericolo per i sottostanti lavori di Campiano. Nella miniera di Campiano, quindi, esistevano (ed esistono) due flussi idrici differenti: uno termale proveniente da quota + 38 m s.l.m. (di circa 10-12 litri al secondo e con pH prossimo alla neutralità) ed uno più freddo proveniente da quota +300 m s.l.m. (mediamente di circa 1,5-3 litri al secondo e con pH intorno a 2-3). Il primo è rappresentato da acque solfatiche simili a quelle che fuoriescono dalle gallerie di scolo di Niccioleta e Boccheggiano ma con temperatura più alta, il secondo dagli AMD della miniera Merse.

Il problema delle ceneri di pirite

Particolare rilevanza, anche a livello nazionale, viene data alle ceneri di pirite che furono stoccate all’interno della miniera di Campiano. Le ceneri di pirite, o ceneri ematitiche, sono il prodotto residuale del ciclo produttivo dell’acido solforico dalla pirite. In passato, quando la pirite veniva estratta a Gavorrano, Boccheggiano e Niccioleta, le ceneri servivano per la produzione di pellets di ossido di ferro da usare come materia prima negli impianti siderurgici. Ciò era ottimale, in quanto della pirite (FeS₂)

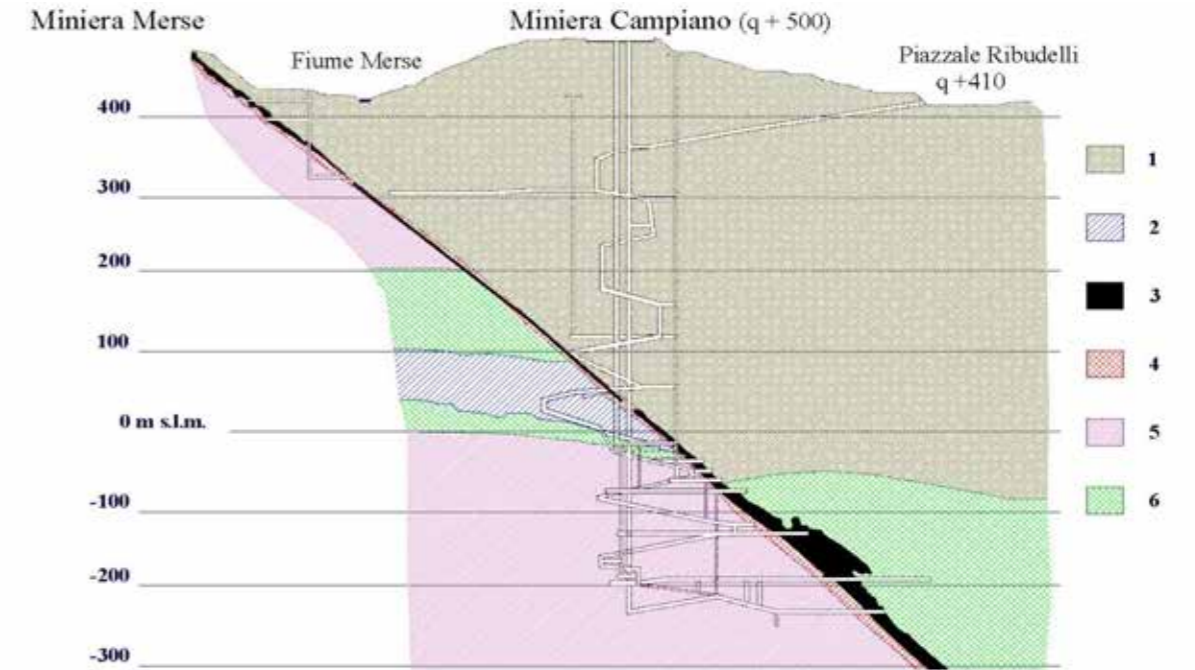


Fig. 4. Miniere Campiano-Merse. Proiezione geomineraria verticale schematica (da Masotti et al., 1987, leggermente modificata). 1 – Flysch allotonico ligure (Argille con calcari Palombini); 2 – Skarn; 3 – Corpi minerari; 4 – Breccia di faglia; 5 – Filladi di Boccheggiano; 6 – Formazione anidritica di Burano/livello “evaporitico” intercalato nelle filladi.

veniva utilizzata sia la componente zolfo, per la produzione di acido solforico, sia la componente ferro in acciaieria. Il loro impiego fu in seguito interrotto perché la pirite, ormai estratta quasi esclusivamente a Campiano, presentava un contenuto di fondo in piombo e zinco troppo elevato per quel tipo di processo. Si iniziò, quindi, ad abbancarle a piè di fabbrica al Casone di Scarlino, dove nel tempo andarono a costituire un ammasso di grandi dimensioni.

In virtù della Legge Regionale n. 60/88, che introduceva il concetto di materia prima secondaria, le ceneri di pirite potevano essere riutilizzate per riempire le cavità minerarie (fare le cosiddette “ripiene”) e così difendersi da fenomeni di subsidenza e di crollo. Fra il 1989 ed il 1993 nella miniera di Campiano furono effettuate ripiene usando ceneri miscelate con roccia rispettivamente nella percentuale di 1/3 e 2/3 secondo quanto previsto dall’autorità di controllo (Corpo delle Miniere del Ministero dell’Industria, ora Ufficio Regionale). Il quantitativo totale di ceneri “messo a dimora” fu di circa 67.000 metri cubi. Nel 1994, al termine dell’attività estrattiva, il totale dei vuoti

della miniera (camere di coltivazione, gallerie e pozzi) era di circa 1.100.000 metri cubi.

È luogo abbastanza comune che le ceneri ematitiche, stoccate nei vuoti della miniera, siano responsabili del contenuto ionico delle acque che fuoriescono. Sull’argomento esistono diversi lavori sperimentali (non tutti pubblicati) che arrivano a conclusioni opposte fra di loro, anche se la maggior parte di quelli consultati esclude che la presenza di ceneri alteri il chimismo delle acque in uscita (si vedano, ad esempio: AA. VV., 1989, 2002 a, b; ENEA e Consorzio Pisa Ricerche, 2001). Ad ogni modo, si può osservare che la miscela ceneri/roccia fu stoccata in miniera tra le quote di -80 m e -180 m s.l.m. (cioè fra 500 e 600 m sotto la superficie) e che le due venute d’acqua all’interno sono ubicate a quota + 38 m s.l.m. e a quota +300 m s.l.m., cioè una 118 metri e l’altra 380 metri sopra la parte più alta delle ceneri (Fig. 5). Sembra poco plausibile l’esistenza di un flusso idraulico che attraversi la miscela ceneri/roccia (a prescindere da ciò che tale interazione possa provocare) e risalga verso l’esterno, visto che l’acqua fa il suo ingresso in miniera a quote sen-

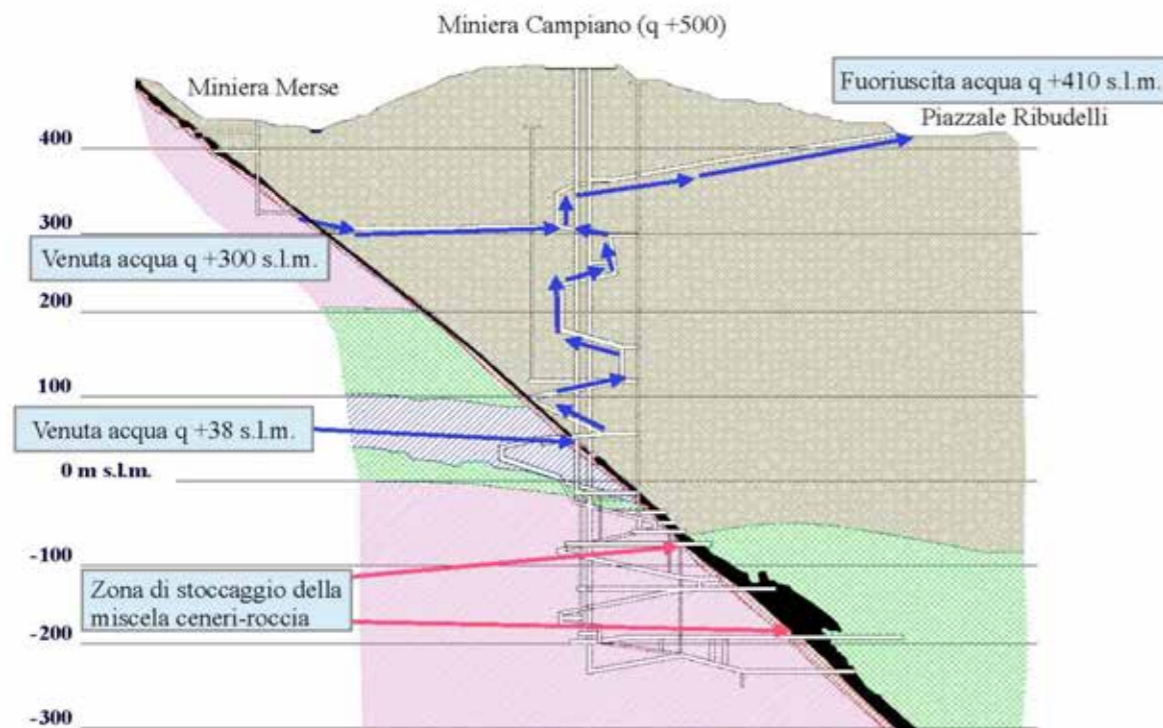


Fig. 5. Miniere Campiano-Merse. Venute interne e direzione del flusso idraulico (freccette blu). Da Masotti et al. (1987) modificata.

sibilmente superiori a quelle delle ceneri. Il flusso dovrebbe averle interessate nella fase iniziale della risalita, vale a dire durante l'allagamento della parte bassa della miniera, quando ancora l'acqua non arrivava all'esterno. Sembra ragionevole supporre che il luogo di deposito della miscela cenere/roccia si trovi in una zona dove l'acqua è praticamente statica, non interessata da moti in grado di portare in superficie le acque profonde, cioè che esista una stratificazione nell'acqua all'interno della miniera favorita anche dalla maggiore densità dell'acqua stessa in seguito al contatto con le ceneri ematitiche. In conseguenza di tutto ciò appare convincente che il chimismo dell'acqua in uscita sul piazzale Ribudelli derivi dal mix delle due venute, che si verifica prevalentemente a quota +300 s.l.m. Viene allora spontaneo pensare (idea peraltro non nuova) che la

prassi da seguire dovrebbe essere quella di provare a separare le due venute e differenziare il trattamento di depurazione, eseguendone uno più "spinto" solo sull'acqua della miniera Merse (fortemente acida e con elevato contenuto in metalli), cioè su una venuta media di 1,5-3 litri al secondo; la problematica della venuta termale profonda (10-12 litri al secondo) si inquadrirebbe invece nel tema generale delle acque solfatiche delle gallerie di scolo, cui si è già accennato, di impatto notevolmente minore. In questa ottica, sarebbe opportuno cercare anche di ridurre la quantità delle acque drenate dalla miniera Merse, soluzione che è già stata peraltro oggetto di studi e progetti. Sarebbe inoltre auspicabile che la progettazione e l'esecuzione degli interventi fosse condotta sulla base anche di tecniche e conoscenze minerarie.

Bibliografia

- AA. VV. (1989) – *Studio scientifico applicativo sulle possibilità di utilizzare le ceneri di pirite per il riempimento dei vuoti di coltivazione*. Istituto di Scienze Minerarie della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.
- AA. VV. (2001) – *Studio dei fenomeni responsabili della fuoriuscita di acque acide dalla ex miniera di Campiano (GR)*. ENEA e Consorzio Pisa Ricerche.
- AA. VV. (2002 a) – *Studio della interazione tra il Pozzo Serpieri e la zona mineraria di Campiano sul sistema idrico del Fiume Merse*. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Territorio dell'Università degli Studi de L'Aquila.
- AA. VV. (2002 b) – *Studio complessivo esteso alle aree interessate dai fenomeni di inquinamento in atto presso la Miniera di Campiano in Comune di Montieri*. Regione Toscana, Giunta Regionale, Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali, Area Rifiuti e bonifiche, Geoscienze S.r.l.
- AA. VV. (2009) – *Correlazione fra le caratteristiche qualitative delle acque presenti nella parte profonda del pozzo Serpieri e le acque in uscita dalla miniera di Campiano*. Dipartimento Provinciale ARPAT di Grosseto.
- AA. VV. (2017) – *Monitoraggio ambientale del sistema Merse – Campiano. Elaborazione ed interpretazione dei risultati dell'attività di monitoraggio anni 2014-2015*. Dipartimento Provinciale ARPAT di Grosseto.
- AA. VV. (Vari anni, a) – *Rapporti annuali sulle lavorazioni minerarie*. Corpo delle Miniere. Ministero del Commercio, dell'Industria e dell'Artigianato.
- AA. VV. (Vari anni, b) – *Relazioni interne, analisi, studi e ricerche sulle acque delle miniere*. Syndial, ENI Group.
- Affuso A.M.G., Garzonio C.A. (2004) *Hydrogeological problems for the rehabilitation and re-utilisation of the water resources of the mining area of Gavarrano (Italy)*. Environmental Geology.
- Avio C.M., Bianchi S., Marchetti M. (1995) – *Prima valutazione del chimismo delle acque della pianura di Follonica e di Scarlino*.

Rivista trimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi, *Geologia Tecnica e Ambientale*, 3.

Bianchi S., Fanciulletti F., Masotti A. (1997) – *Prima valutazione del chimismo delle acque delle Colline Metallifere*. Rivista trimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi, *Geologia Tecnica e Ambientale*, 2.

Borgna L., Di Lella L.A., Pisani A., Protano G., Riccobono F. (2004) – *L'inquinamento da arsenico e metalli pesanti del Fiume Merse*. Accademia dei Fisiocritici di Siena, *Etrurianatura*, 1.

Brizzi G., Capperi M., Masotti A. (1989) – *La miniera di pirite di Niccioleto - Massa Marittima (GR). I^a Parte*. Rivista Mineralogica Italiana, 4.

Crosta G., Garzonio C.A. (1998) – *Engineering Geology problems in the Closing Down of Mining Areas – Hydrogeological Problems of Mining Rehabilitation*. Environmental Management.

Favilli G., Masotti A. (1988) – *Gli scavi nella miniera di Campiano*. L'Industria Mineraria, 1.

Gisotti G., Giannerini D., Masini E., Baldassarri L. T. (2011) – *L'inquinamento del fiume Merse dalla miniera di Campiano (GR)*. *Geologia dell'Ambiente*, 1.

Gistri D., Masotti A. (1992) – *Attività geo-minerarie e chimico-metallurgiche della "Nuova Solmine" S.p.A. e loro impatto ambientale*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 42.

Lotti B. (1910) – *Geologia della Toscana*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 13.

Lotti B. (1931) – *La sorgente termale del Bagno di Gavarrano in Provincia di Grosseto*. Bollettino del R. Ufficio geologico d'Italia, 56 (4).

Masotti A., Favilli G. (1987) – *Il giacimento di Campiano*. L'Industria Mineraria, 4.

Masotti A. (1990) – *Utilizzo delle scorie ematitiche di pirite "materie prima secondarie"*. (Report). Quarry and Construction, 2.

Masotti A. (1994) – *Le miniere delle Colline Metallifere*. Giornata di studio in ricordo del Prof. Stefano Zucchetti. Politecnico di Torino, Dipartimento di Georisorse e Territorio.

Scarafia P. (1927) – *L'acqua del Bagno di Gavarrano*, esame chimico-fisico, analisi chimica e batteriologica. Arezzo.

Ringrazio il caro amico Prof. Roberto Mazzei per i preziosi consigli.

Le zone termali marine: un modello per studiare gli effetti dell'acidificazione degli oceani sulle popolazioni naturali

Ilaria Corsi e Elisa Bergami

Università di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, via Mattioli, 4 – 53100 Siena.
 ilaria.corsi@unisi.it

Ecotossicologia e cambiamenti globali

L'ecotossicologia è la disciplina che studia l'impatto delle sostanze chimiche su individui (dalla singola cellula, al tessuto, all'organo, all'organismo), popolazioni, comunità ed interi ecosistemi naturali (allorché si producono squilibri trofici in grado di alterarli in modo più o meno stabile). Per raggiungere questo obiettivo, essa si avvale di *test* e metodi per l'analisi della dispersione, del comportamento e della trasformazione delle sostanze chimiche, al fine di poter valutarne la ripartizione in aria, acqua e suolo ed identificarne potenziali bersagli biologici nelle popolazioni naturali.

Gli ecotossicologi sono stati abituati ad un relativamente modesto tasso di cambiamento ambientale ed ecosistemico. Le variazioni climatiche globali, in gran parte dovute alle emissioni di gas serra antropogenici, stanno invece causando profonde modificazioni nell'ambiente naturale; fra l'altro, il loro effetto va a sommarsi all'inquinamento di acqua, suolo ed aria indotto dalle crescenti attività umane. La rapidità con cui questi processi si stanno verificando ha come conseguenza diretta la necessità di sviluppo degli studi ecotossicologici. In proposito è da sottolineare che i metodi utilizzati a livello internazionale per comparare diverse aree del pianeta ed adottare misure di contenimento, mitigazione e recupero sono in gran parte ancora in auge nonostante esistano da oltre mezzo secolo. I comuni *test* di tossicità, effettuati in laboratorio sia su singole specie (saggi ecotossicologici) che su piccole reti trofiche

(microcosmi), sebbene implementati ed adattati a nuovi inquinanti (molecole e materiali) immessi in circolazione dall'Uomo, sono stati impiegati per decenni con l'accortezza di definirne i limiti riguardo alla sicurezza ambientale. Al contrario, studi condotti direttamente in ambienti naturali controllati (noti anche come mesocosmi) e difficilmente replicabili, sono considerati attualmente "a maggior rischio", soprattutto per le condizioni climatiche estremamente variabili a livello sia locale che globale. Riguardo a queste ultime, si stima che per l'anno 2100 la pressione atmosferica parziale di anidride carbonica (pCO_2) raddoppierà rispetto ai livelli pre-industriali e che i suoi valori siano da ritenersi i più alti degli ultimi milioni di anni (Pearson & Palmer, 2000).

L'acidificazione degli oceani e le zone termali marine

Com'è noto, la CO_2 prodotta dalle attività umane viene inglobata prevalentemente dagli oceani. Ciò ha fatto sì che si giungesse ad un aumento della concentrazione di ioni idrogeno (H^+) nelle acque superficiali pari al 30% ; secondo le più recenti stime, inoltre, tale aumento potrebbe portare a un calo del pH dell'acqua fino a 0,5 unità entro il 2100 (Hartin *et al.*, 2016; IPCC, 2007; Caldeira & Wickett, 2005). L'abbassamento del pH delle acque, conosciuto come acidificazione degli oceani, sta da alcuni anni preoccupando la comunità scientifica internazionale perché ha dif-

ficoltà a prevederne le conseguenze sugli ecosistemi naturali e sulle specie che li popolano (Gattuso *et al.*, 2000). Sembra comunque accertato che elevati valori di pCO_2 nell'acqua di mare (fenomeno conosciuto con il termine di ipercapnia) possa mettere a repentaglio l'equilibrio degli organismi nelle nicchie ecologiche fino a provocare l'estinzione delle specie più sensibili. La diminuzione della saturazione di carbonato di calcio ($CaCO_3$) influisce sui tassi di calcificazione e provoca alterazioni nell'equilibrio acido-base fisiologico, quello che consente agli organismi di mantenere il pH corporeo tra valori di 7,35 e 7,45 e di svolgere le loro funzioni metaboliche (Fabry *et al.*, 2008) (Fig. 1).

Relativamente agli ecosistemi marini, è stato documentato come una vasta diversità di specie risponde in modo simile all'acidificazione indotta dalla CO_2 atmosferica (Riebesell *et al.*, 2000). A titolo di esempio, si ricordano quegli organismi dotati di gusci o scheletri calcarei (coralli, molluschi, echinodermi e crostacei), i quali vanno incontro ad una ridotta calcificazione, crescita e sopravvivenza. Purtroppo, le conoscenze sull'origine, sull'incremento e sulle possibili conseguenze

dell'acidificazione delle acque negli ecosistemi marini sono molto limitate. Infatti, la maggior parte delle ricerche in tal senso viene condotta mediante incubazioni in laboratorio "a breve termine", abbassando in maniera arbitraria il pH delle acque ed esponendo gli organismi a scenari ipotetici che potrebbero rivelarsi lontani dalle condizioni future degli oceani e dei mari.

Oggi, però, è possibile analizzare gli effetti dell'acidificazione sulle comunità naturali grazie al rinvenimento, in alcune aree marino-costiere, di fonti naturali di CO_2 (origine vulcanica) che provocano diminuzioni locali del pH delle acque (Hall-Spencer *et al.*, 2008). Queste aree, particolarmente abbondanti nel bacino Mediterraneo e ancor più in Italia ed in Grecia, rappresentano dei modelli unici per uno studio sperimentale, in quanto si sono evolute per millenni in condizioni estreme di basso pH, talvolta associate a temperatura elevata e a presenza di idrogeno solforato (H_2S).

La zona costiera dell'Isola di Ischia, che circonda il versante Nord-Sud del Castello Aragonese (40°43,84' N; 013°57,08' E), mostra questi peculiari aspetti con sfati idrotermali caratterizzati da emissioni pari al 90-95% di CO_2 , allo 0,6-

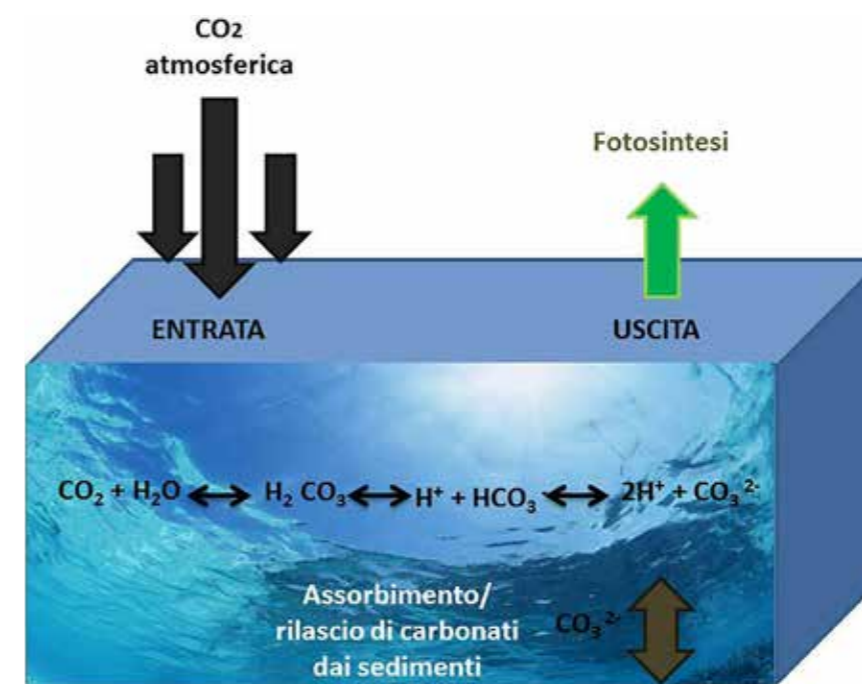


Fig. 1. Descrizione del bilancio di CO_2 a livello oceanico e dell'impatto causato dall'aumento a livello atmosferico. Il sistema di regolazione acido-base che coinvolge anidride carbonica-bicarbonato-carbonato regola l'equilibrio della CO_2 a livello oceanico. La fotosintesi da parte del fitoplancton marino e delle piante acquatiche e la respirazione di tutti gli altri organismi marini contribuiscono al bilancio globale di CO_2 . A perturbare questo delicato equilibrio vi è il maggior apporto della CO_2 da parte dell'atmosfera. Tale aumento tende a spostare l'equilibrio anidride carbonica-bicarbonato-carbonato in direzione acida. Infine il rilascio di carbonato dai sedimenti marini sposta l'equilibrio biossido di carbonio-bicarbonato-carbonato in direzione alcalina. L'acidificazione delle acque viene causata se l'aumento di CO_2 atmosferica e l'assorbimento di carbonati da parte dei sedimenti superano l'utilizzo della stessa per la fotosintesi e la risalita dei carbonati dai sedimenti.

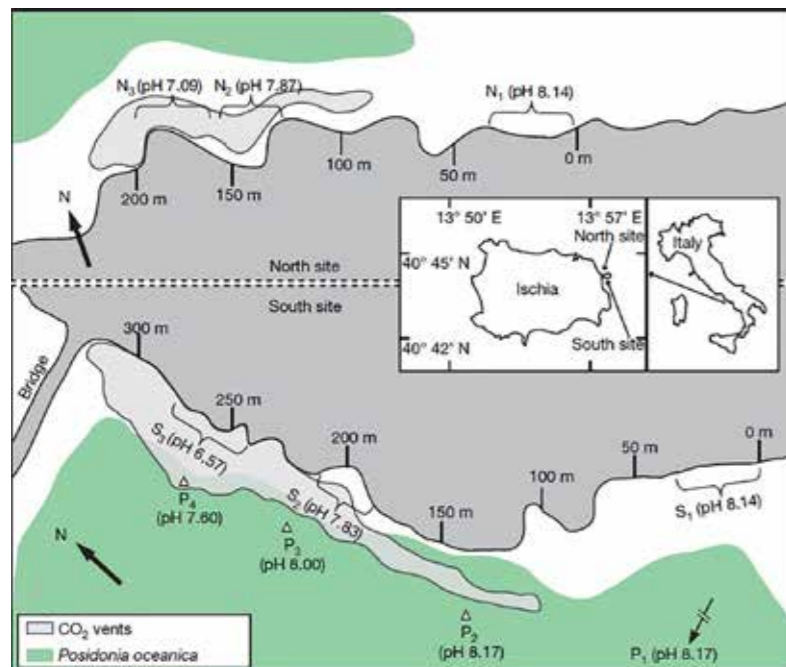


Fig. 2. Mappa dei siti di emissione di CO₂ a Nord e Sud del Castello Aragonese, al largo dell'isola di Ischia (Italia). Sono riportati i valori medi di pH registrati nelle acque superficiali lungo una costa rocciosa di 35m in 6 siti indicati con N1-N3 e S1-S3, rispetto a 4 siti in prossimità e all'interno della prateria della pianta acquatica *Posidonia oceanica* (in verde) (P1-P4) (fonte Hall-Spencer et al., 2008).

0,8% di O₂, allo 0,08-0,1% di argon (Ar) e allo 0,2-0,8% di metano (CH₄), nonché dalla pressoché assenza di solfuri (Hall-Spencer et al., 2008) (Fig. 2). Il pH nelle acque scende da un minimo di 0,1 unità fino ad un massimo di 1,5, raggiungendo valori che potrebbero registrarsi in futuro a seguito dell'aumento dell'acidificazione degli oceani.

Ricerche portate avanti dalla Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli, in collaborazione con l'Università di Stanford (USA), hanno messo in evidenza come le comunità bentoniche marine presentino, nelle zone con i più bassi valori di pH (6,5), una riduzione del numero di taxa, una ridotta uniformità tassonomica ed una minore biomassa. Basandosi su tali risultati, si potrebbe ipotizzare una riduzione della biodiversità ed una semplificazione delle reti trofiche come possibile conseguenza dell'acidificazione degli oceani (Kroeger et al., 2012).

In uno studio parallelo condotto nella medesima area dall'Università di Plymouth (Regno Unito), con la partecipazione della Stazione Zoologica Anton Dohrn, del CNR e di altri atenei italiani, nelle zone a bassi valori di pH sono stati documentati chiari esempi di dissoluzione nelle

conchiglie di alcuni gasteropodi (*Osilinus turbinatus*, *Hexaplex trunculus* e *Patella caerulea*) e negli esoscheletri di echinodermi (*Paracentrotus lividus* e *Arbacia lixula*) (Hall-Spencer et al., 2008) (Foto 1). Le conseguenze della riduzione della calcificazione, sia a livello di singolo organismo che di comunità ecologica, sono ancora pressoché sconosciute. Con molta probabilità la presenza di conchiglie ed esoscheletri più sottili può ridurre la *fitness* di questi organismi, i quali potrebbero soccombere rispetto ad altri non calcificanti e/o essere soggetti ad un maggior rischio di predazione. L'evidente riduzione della biodiversità, descritta nelle aree a basso pH della costa di Ischia, supporta queste ipotesi e delinea situazioni preoccupanti per la conservazione delle specie e la capacità di resilienza degli ecosistemi marini negli anni avvenire.

Acidificazione degli oceani ed inquinamento chimico: quali scenari

Al peculiare contesto di fragilità ecosistemica, che caratterizza le zone termali marino-costiere, si aggiungono pressioni di origine antropica

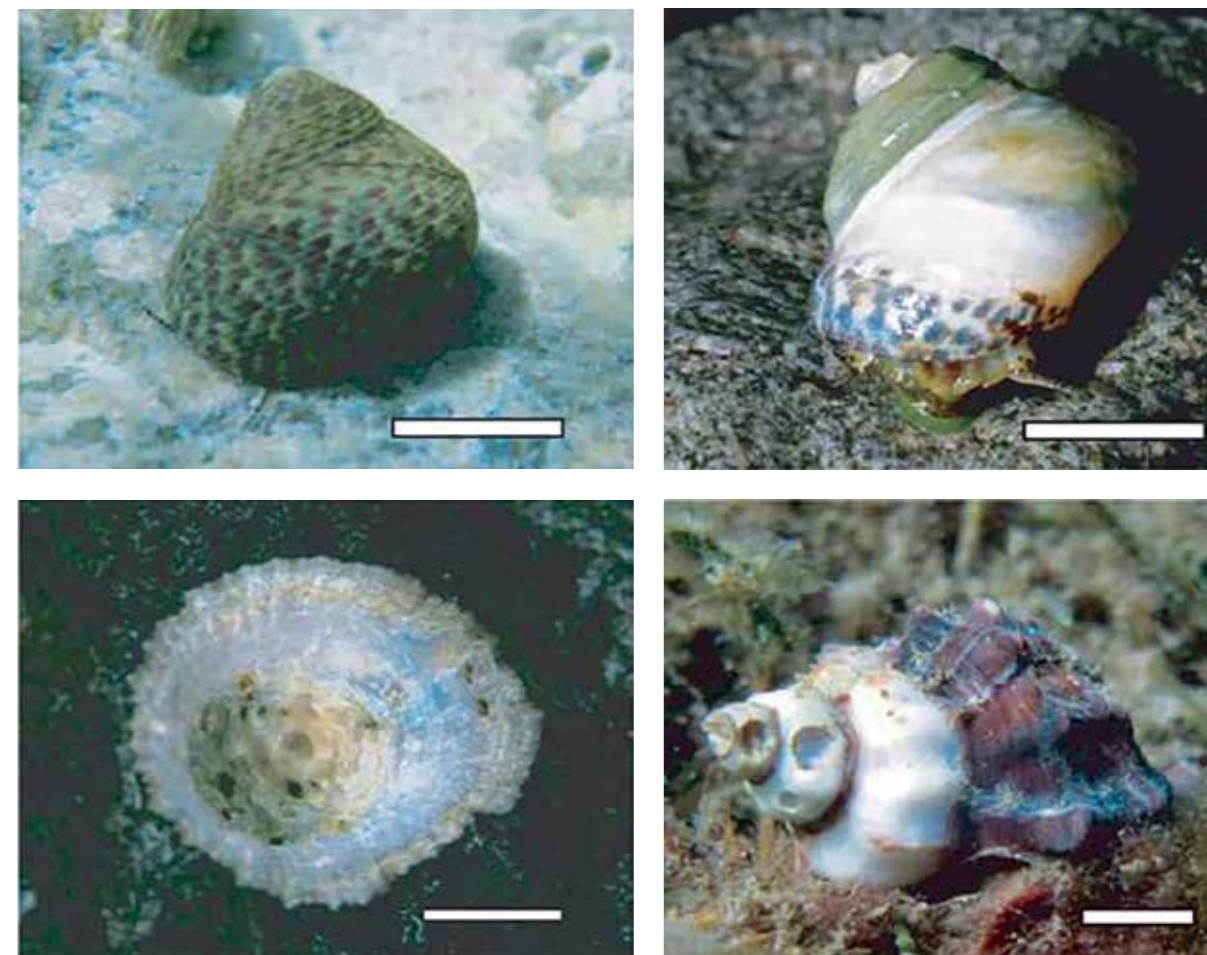


Foto 1. Immagini che riportano gli effetti dell'esposizione a bassi valori di pH a livello delle conchiglie di esemplari marini presenti nei siti di emissione di CO₂ a Nord e Sud del Castello Aragonese, al largo dell'isola di Ischia (Italia). In alto esemplari di *Osilinus turbinatus* con periostraco intatto (immagine a sinistra) nei popolamenti presenti a pH 8.2 e con la parte esterna del periostraco rimossa negli esemplari a pH 7.3 (immagine a destra). Nelle immagini sotto, esemplari di *Patella caerulea* (a sinistra) e *Hexaplex trunculus* (a destra) che mostrano evidenti fenomeni di erosione delle conchiglie nei popolamenti a pH 7.4 (fonte Hall-Spencer et al., 2008). Scala dimensionale di= 1 cm.

riguardanti l'inquinamento chimico; questo può essere dovuto sia al rilascio locale dei reflui di depurazione urbana ed industriale, sia al trasferimento da altre fonti inquinanti tramite il movimento delle masse d'acqua superficiali e profonde. Sugli scenari che si possono creare, a seguito della esposizione a bassi valori di pH e della presenza di inquinanti chimici nelle comunità marine, la conoscenza è alquanto limitata e di difficile generalizzazione; ciò è legato al fatto che entrambi i fenomeni interessano in maniera differente le aree marine del nostro pianeta.

Per quanto concerne l'acidificazione delle acque superficiali oceaniche, dai modelli previsio-

nali (Orr et al., 2005) emerge che nel XXI secolo i cambiamenti potrebbero riguardare maggiormente gli oceani Artico e Antartico (Fabry et al., 2008). Infatti, la loro bassa temperatura provoca una maggiore solubilità della CO₂ atmosferica e, di conseguenza, il fenomeno dell'acidificazione risulta più marcato.

Le regioni antartiche polari e subpolari sono considerate più a rischio anche perché soggette ad una maggiore irradiazione UV e ad un apporto di acque dolci per fusione glaciale; tale apporto limita ulteriormente la saturazione del carbonato, con conseguenze significative sulla formazione degli scheletri e dei gusci degli organismi calcifican-

ti. Purtroppo in queste regioni si rilevano perfino fenomeni di inquinamento chimico, i quali potrebbero influire negativamente sulla capacità di adattamento delle comunità naturali alla già alta acidificazione delle acque (http://www.ats.aq/e/ep_marine.htm) legata ai cambiamenti climatici.

Un primo studio che tocca questi argomenti è stato condotto recentemente, nell'ambito del progetto PLANET (PLastics in the ANtartic Environment) (Bergami *et al.*, 2016 a), attraverso una collaborazione tra la sezione di Ecotossicologia dei contaminanti emergenti e nano materiali del Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente (DSFTA) dell'Università di Siena ed il British Antarctic Survey (BAS) di Cambridge (Regno Unito). Tale studio, che rientra nel più ampio Programma Nazionale di Ricerca in Antartide (PNRA) del 2016, era finalizzato alla valutazione dell'impatto delle plastiche sull'ecosistema marino. La presenza di rifiuti plastici, incluse le microplastiche (1-5 mm), nei sedimenti e nelle acque superficiali delle regioni antartiche sub-polari e polari costituisce un problema rilevante ed è oggetto di grande attenzione a livello internazionale (Waller *et al.*, 2017).

La dimensione delle plastiche può avere un ruolo fondamentale per determinarne la tossicità: le nanoplastiche (quelle di dimensioni nanometriche e cioè più piccole) possono attraversare le principali barriere corporee ed entrare nelle cellule degli organismi provocando tossicità. Come descritto nell'articolo di Bergami *et al.* (2016 b), intitolato *L'impatto delle plastiche in ambiente marino* e pubblicato nel numero 2016 di *Etrurianatura*, le nanoplastiche (<100 nm) possono portare addirittura alla morte degli organismi esposti in funzione del loro comportamento nelle acque e delle loro cariche superficiali. Tenendo presenti questi aspetti è oggi in corso una ricerca per valutare le possibili sinergie tra l'esposizione a nano polistireni (nanoplastiche) e ad acque acidificate dell'Oceano Antartico; come organismo modello per raggiungere lo scopo è stata scelta una specie importante dell'ecosistema marino, lo pteropode *Limacina helicina antartica*.

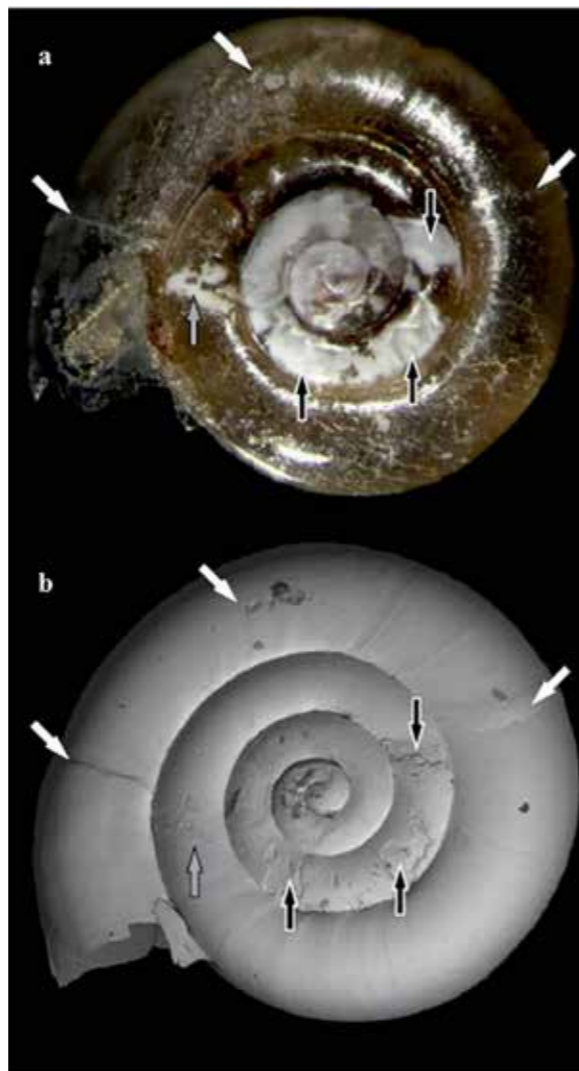


Foto 2. Immagini dello pteropode *Limacina helicina* mostrandoti fenomeni di erosione ed ispessimento della conchiglia in risposta a danneggiamenti della superficie in seguito a varie forme di stress (fonte Peck *et al.*, 2018). Immagine in alto (a) ottenuta mediante microscopia ottica, immagine in basso ottenuta mediante SEM (b).

Gli pteropodi (molluschi pelagici) sono considerati organismi "sentinella" proprio per riconoscere gli effetti dell'acidificazione delle acque (CIEM/OSPAR, 2015). I loro gusci sottili sono costituiti infatti da aragonite, una forma altamente solubile di CaCO_3 biogenico e pertanto sono da ritenersi particolarmente vulnerabili ai cambiamenti in atto. Gli pteropodi rappresentano, inoltre, una componente significativa dello zooplancton marino delle aree antartiche ed un anello chiave all'interno delle reti trofiche in quanto

importante per l'apporto di carbonio nell'oceano. Di conseguenza, eventuali riduzioni nelle popolazioni di pteropodi avranno implicazioni significative per la biodiversità, sia nei processi biogeochimici che ecologici.

Nell'Oceano Antartico sono già stati documentati in tempi recenti l'assottigliamento o l'ispessimento del guscio degli pteropodi (Foto 2) per cui risulta evidente la necessità di valutarne gli effetti a livello sia di organismo che di popolazione.

La loro migrazione verticale nella colonna d'acqua non li espone solo a rapidi cambiamenti nella chimica del carbonato, ma anche alle plastiche flottanti di piccola dimensione. In proposito si ricorda che una recente ricerca nell'Oceano Atlantico ha messo in evidenza la presenza di nanoplastiche nelle acque superficiali al largo di vaste zone interessate da accumuli di macro- e microplastiche (vortici flottanti), e, tra i polimeri, ha riconosciuto anche il polistirene (Ter Halle *et al.*, 2017). Da rilevare, infine, che ultimamente è stata segnalata la capacità del krill antartico (*Euphausia superba*), in seguito ad ingestione, di produrre na-

noplastica dalla frammentazione della microplastica (Dawson *et al.*, 2018).

Considerazioni e ricerche future

Le eventuali sinergie tra acidificazione e inquinamento da plastica (così come da altri contaminanti chimici) vanno ricercate nelle aree marine dove i fenomeni producono gli effetti più drastici. Studi puntuali in questo senso potrebbero consentire di formulare previsioni più robuste sulle conseguenze nelle singole popolazioni naturali e negli interi ecosistemi. L'aver a disposizione aree termali marine dove l'acidificazione ha già svolto una pressione selettiva e la pressione antropica rappresenta un elemento di disturbo, è da considerarsi un'ottima occasione per portare avanti tali studi.

I siti termali presenti lungo le coste italiane e greche costituiscono, pertanto, laboratori a cielo aperto unici per gli ecotossicologi in quanto possono trovarvi le risposte che cercano per definire meglio i possibili scenari futuri.

Si ringrazia la collega Clara Manno del British Antarctic Survey per aver accettato di anticipare le attuali ricerche in corso sull'effetto dell'acidificazione e dell'esposizione a nanoplastiche negli pteropodi antartici.

Opere citate

- Bergami E., Grattacaso M., Cappello C., Machado Cunha da Silva J.R., KrupinskiEmerenciano A., González-Aravena M., Cárdenas C.A., Macalí A., Waluda C., Virtue P., Venuti V., Rossi B., Manfra L., Angeletti D., Mattiucci S., Nascetti G., Marques-Santos L.F., Canesi L., Olmastroni S., Corsi I. (2016 a). *PLastics in ANtartic Environment - the PLANET International scientific project aimed to assess both the presence and impact of micro and nanoplastics to Antarctic marine biota*. Proceeding of the CCAMLR Symposium on the Ross Sea Ecosystem: 20-21.
- Bergami E., Pugnolini S., Faleri C., Corsi I. (2016 b). *L'impatto delle plastiche in ambiente marino*. *Etrurianatura*, Periodico dell'Accademia dei Fisiocritici, Siena. Anno XI, 2015-2016: 14-20.
- Caldeira, K. & Wickett, M. E. (2005). *Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the*

atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research*, 110: C09S04.

Fabry, V.J., Seibel, B. A., Feely, R.A., and Orr, J.C. (2008). *Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes*. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 414432.

Gattuso J.P., Buddemeier R.W. (2000). *Ocean biogeochemistry. Calcification and CO2*. *Nature*, 407: 311-313.

Hall-Spencer J.M., Rodolfo-Metalpa R., Martin S., Ransome E., Fine M., Turner S.M., Rowley S.J., Tedesco D. & M.C. Buia (2008). *Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification*. *Nature* 454 (7200): 96-99.

Hartin C.A., Bond-Lamberty B., Patel P., Mundra A. (2016). *Ocean acidification over the next three centuries using a simple global climate carbon-cycle model: projections and sensitivities*. *Biogeosciences*, 13: 4329-4342.

ICES. 2014. Final Report to OSPAR of the Joint OSPAR/ICES Ocean Acidification Study Group (SGOA). ICES CM

2014/ACOM:67. 141 pp. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Summary for Policymakers*. In Climate Change 2007: The Physical Sciences Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (eds. Solomon, S. et al.) (Cambridge Univ. Press, Cambridge).

Kroeker K.J., Micheli F., Gambi M.C., Martz T.R. (2011). *Divergent ecosystem responses within a benthic marine community to ocean acidification*. Proceeding of the National Academy of Science USA 108:14515–14520.

Manno, C., Sandrini, S., Tositti, L. & Accornero (2007). *A. First stages of degradation of Limacina helicina shells observed above the aragonite chemical lysocline in Terra Nova Bay (Antarctica)*. Journal Marine Systems 68: 91–102 .

Orr, J. C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., et al. (2005). *Anthropogenic oce-*

an acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437: 681–686.

Pearson, P. N. & Palmer, M. R. (2000) - *Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years*. Nature, 406: 695–699.

Riebesell U., Zondervan I., Rost B., Tortell P.D., Zeebe R.E., Morel F.M.M. (2000) *Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂*. Nature 407: 364–367.

Ter Halle A., Jeanneau L., Martignac M. Jarde E., Pedroño B., Laurent B. and Gigault J., (2017). *Nanoplastic in the North Atlantic Subtropical gyre*. Environmental Science and Technology, 51(23): 13689-13697

Waller C.L., Griffiths H.J., Waluda C.M., Thorpe S.E., Loaiza I., Moreno B., Pachterres C.O., Hughes K.A. (2017). *Microplastics in the Antarctic marine systems: an emerging area of research*. Science of the Total Environment 598: 220-227.

La parola all'immagine

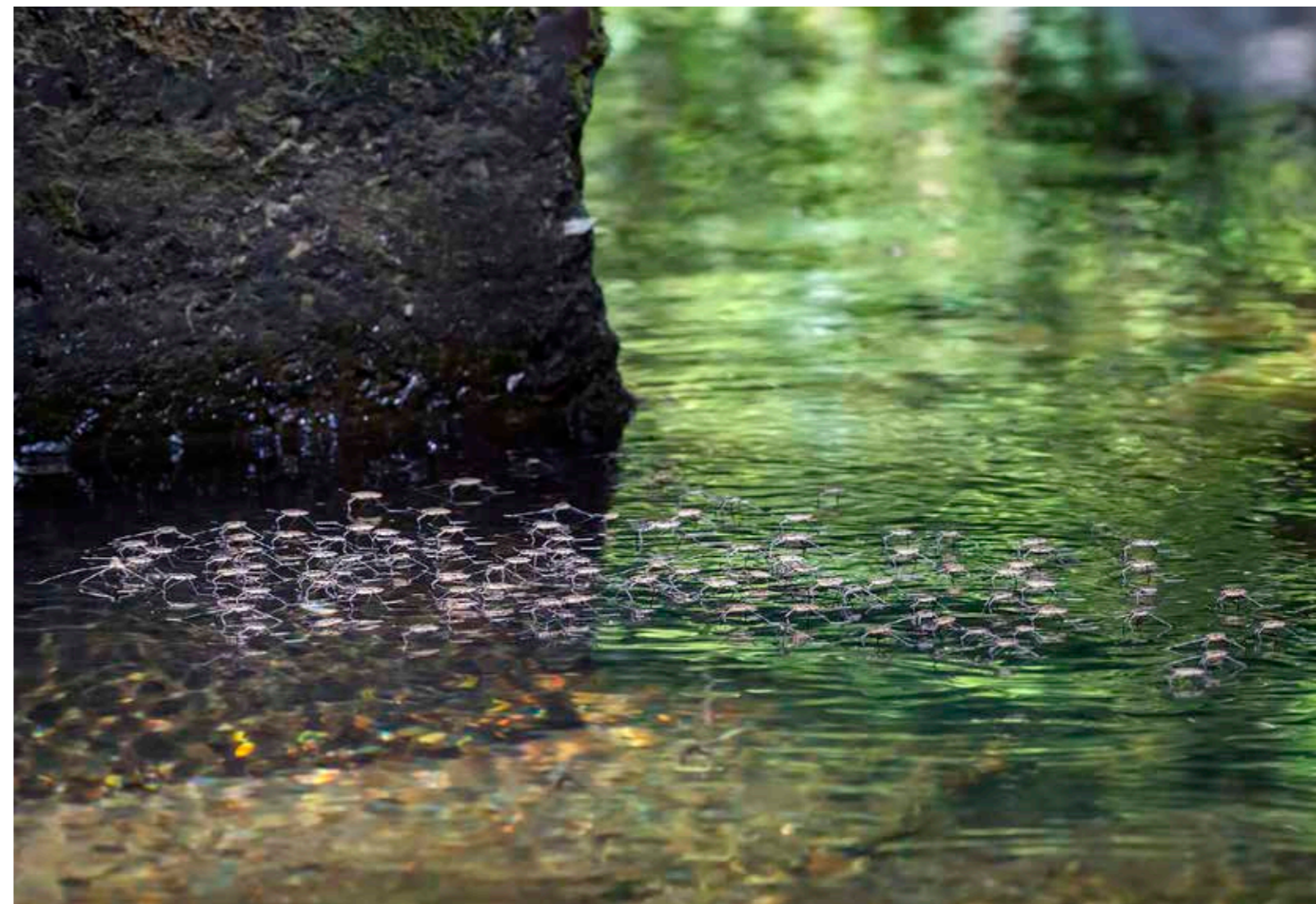


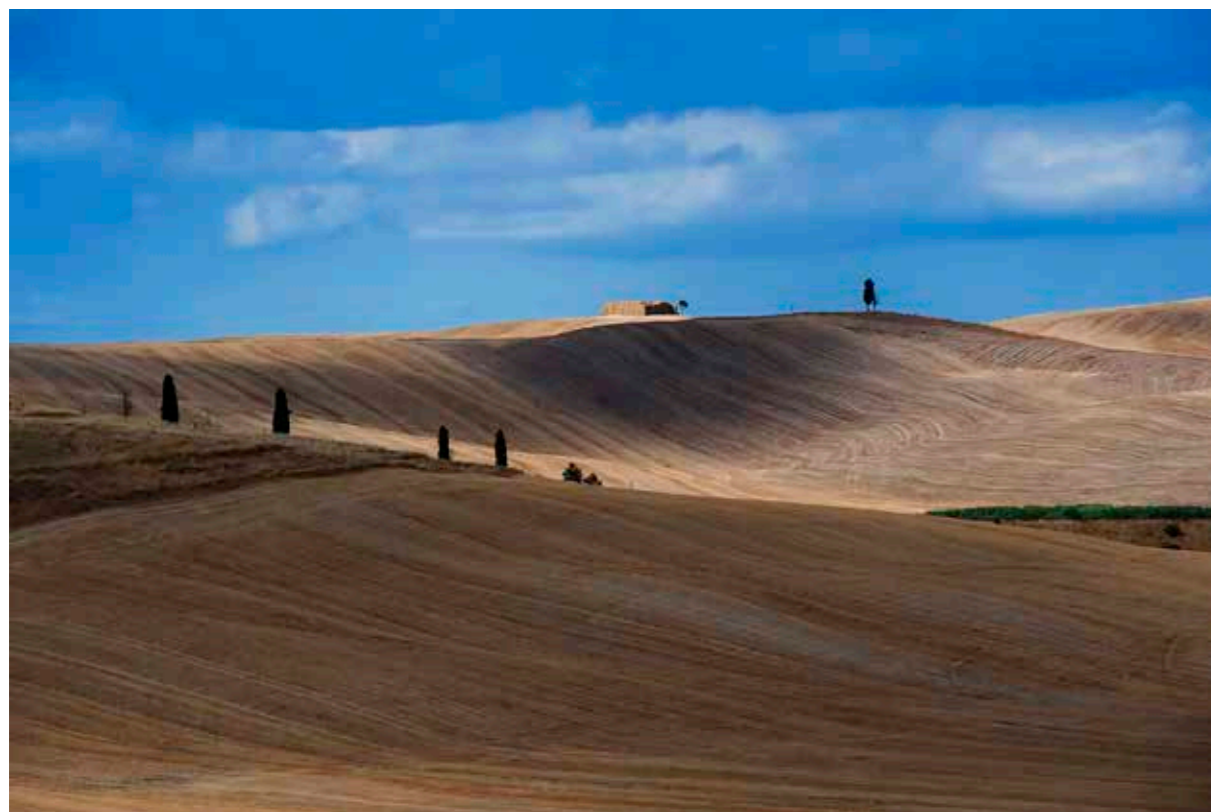
Foto di Giovanni Bencini

L'Uomo incontra l'armonia della Natura nelle colline senesi

Giovanni Bencini



L'UOMO INCONTRA L'ARMONIA DELLA NATURA NELLE COLLINE SENESI











Il punto della situazione



Le acque termominerali di Petriolo

Massimo Fanti*, Massimo Salleolini**

* HERA S.r.l., Via Siria 102 - 58100 Grosseto (massimo.fanti@herasrl.it)

** Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Strada Laterina 8 - 53100 Siena (massimo.salleolini@unisi.it)

“Non dimentichiamo che il ciclo dell’acqua e il ciclo della vita sono una cosa sola”

Jacques-Yves Cousteau (1910-1997)

Fin dall’Antichità i popoli hanno utilizzato le acque per finalità terapeutiche. In pratica, con le acque termali e la loro storia nasce la medicina intesa come cura e mantenimento della salute: al di là della loro sacralità, nella Roma imperiale esse assunsero un’importanza tale che il benessere si configurava con il frequentare le terme. Il termine Spa, che attualmente indica le stazioni termali o in generale le aziende che forniscono cure idroterapiche, deriva dall’omonima cittadina belga nota dal XIV secolo per le sue acque minerali; tale termine è inteso anche come sigla del latino “Salus Per Aquam” o “Sanare Per Aquam” e cioè “la salute grazie all’acqua”. In Italia esistono numerosi complessi termali che hanno assunto fama in tutto il mondo, come ad esempio quelli di Abano in Veneto, Castrocaro in Emilia Romagna e Montecatini in Toscana. Nella Toscana meridionale, comunque, se ne trovano alcuni certamente non meno rinomati per la qualità delle loro acque e noti fin dall’epoca romana o addirittura etrusca, associati a peculiari circuiti idrogeologici in specifici contesti geologico-strutturali.

Introduzione

L’articolo vuole descrivere in modo sintetico le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche della zona di Petriolo, le quali hanno portato ad emergere acque calde dotate di particolari proprietà terapeutiche. Queste acque erano già conosciute nell’antica

Roma; infatti, esse sono ricordate da Marco Tullio Cicerone nella sua “Orazione per Marco Coelio”, pochi decenni prima della nascita di Cristo (Cambria, 2013). Per volontà della Signoria di Siena la località iniziò ad attrezzarsi a stazione termale a partire dal 1266; l’antico edificio è ancora visibile su un lato del ponte che attraversa il T. Farma (Foto 1). Nel 1325 il medico Gentile da Foligno scrisse il *Tractatus de Balneis* dove consigliava di curarsi con le acque di Petriolo a coloro che erano affetti da malattie respiratorie e dolori articolari. Lo stesso fece Michele Savonarola (nonno del più celebre Girolamo), medico naturalista del tardo trecento, che ne esaltava le proprietà lenitive nei confronti dei dolori e “delle sofferenze fredde e umide delle membra”. Nel 1404 fu iniziata la fortificazione delle terme con lo scopo non solo di salvarle dalle invasioni, ma anche di tutelare le illustri personalità che vi si recavano (ad esempio, Giovanni e Bernardo dei Medici nel 1443 e i Gonzaga nel 1461). Fra tutte le frequentazioni spicca però il Pontefice Pio II (al secolo Enea Silvio Piccolomini), che per curare un’artropatia vi si recò per la prima volta il 2 giugno 1460. Oggi Petriolo presenta bagni termali fruibili liberamente (Foto 1) e stabilimenti attrezzati anche con strutture alberghiere.

Cenni geologici, idrogeologici e geomorfologici

La Val di Farma è da considerarsi un territorio di elevato pregio ambientale (Foto 2), la cui



Foto 1. I Bagni di Petriolo. A sinistra: le antiche terme con la sovrastante chiesa, entrambe di origine medievale. A destra: le acque calde (ipertermali, secondo Marotta & Sica, 1929), di cui si può usufruire gratuitamente, provengono dal sottosuolo mediante un pozzo naturalmente fluente ed alimentano vasche in travertino sulle sponde e nel letto del Farma.

caratteristica principale è la varietà del paesaggio; accanto ad una rilevante presenza di aree di alta collina, dove ampie superfici sono ricoperte da boschi rigogliosi, vi sono molte aree rurali di media collina e numerosi sono i centri abitati anche se di piccole dimensioni (la densità di abitanti è piuttosto bassa). La zona di Petriolo, ubicata al confine tra i comuni di Monticiano (Siena) e di Civitella Paganico (Grosseto), è incisa dal corso inferiore del Torrente Farma e ben si inserisce nel contesto geologico, geomorfologico e paesaggistico della valle (i rilievi, che raggiungono altezze di 250 - 550 m e mostrano morfologie localmente dolci, appartengono al settore orientale della Dorsale Medio - Toscana), la quale confluisce in quella più ampia del Fiume Ombrone.

Dal punto di vista idrologico il bacino del Farma mostra i contributi unitari¹ medi annui più elevati (circa 16 L/s·km²) all’interno del bacino dell’Ombrone, con valori doppi rispetto a quello del Fiume Orcia (circa 7 L/s·km²). Esso è interessato da precipitazioni medie di circa 1.000 mm/anno, concentrate nel quadrimestre settembre-dicembre (oltre il 40 % del totale), con minimo a luglio e massimo a ottobre-novembre; le temperature medie annue sono di circa 13 °C, con un minimo di 5 °C a gennaio ed un massimo di 22

°C a luglio ed agosto. Seguendo la classificazione climatica di Thornthwaite (1948) e gli studi di Barazzuoli *et al.* (1993), la Val di Farma risulta compresa nei climi umidi B₁ e B₂ (indice di umidità globale compreso tra 20 e 60). La sua peculiare conformazione è all’origine di un vistoso fenomeno di inversione termica; è il fondovalle, infatti, ad essere colonizzato dal faggio, dall’acero di monte e persino dalla betulla, piante tipiche di altitudini maggiori (Studio Mattioli S.r.l., 2012).

Nelle gole del Farma, a monte di Petriolo, affiorano formazioni del Devoniano (Periodo dell’Era Paleozoica) risalenti a circa 400 milioni di anni fa, che sono anche le più antiche dell’Appennino. L’evoluzione tettonica post-collisionale e le differenti caratteristiche litologiche hanno prodotto l’attuale assetto del reticolo idrografico ed hanno influenzato e definito la circolazione idrica superficiale e profonda; la morfologia e la pendenza dei versanti rispecchiano le proprietà tecniche delle rocce affioranti.

I rilievi dell’area di Petriolo, facenti parte come detto della Dorsale Medio -Toscana, sono in prevalenza costituiti dalle formazioni del Verrucano e del basamento paleozoico (Unità Toscane metamorfiche) su cui poggiano il Calcere cavernoso (Falda Toscana) in lenti e le Unità Liguri tetto-

1. Il contributo unitario di un corso d’acqua è definito dal rapporto tra la portata media mensile (o annua) e la superficie del bacino sotteso; questa grandezza definisce pertanto il contributo che ogni km² di bacino fornisce in media, mese per mese (o annualmente), al deflusso del corso d’acqua considerato.



Foto 2. A sinistra, panoramica della Val di Farma offerta dal Ponte di Petriolo sulla superstrada Siena-Grosseto. A destra, il geotopo² "I Canaloni" (il nome deriva dalle profonde incisioni che l'acqua ha realizzato nella roccia altamente fratturata; Costantini *et al.*, 2015).

nicamente sovrascorse (Costantini *et al.*, 1988; Lazzarotto *et al.*, 2003; Aldinucci *et al.*, 2008; Engelbrecht, 2008) (Fig. 1). La particolare conformazione geologico - strutturale è dovuta alla presenza di due importanti strutture dirette: la prima, a direzione circa E-O, è denominata Faglia di Petriolo; la seconda, più o meno perpendicolare alla prima, è nota come Faglia delle Caldanelle (Fig. 1-2). Tali strutture dislocano e sollevano le formazioni più profonde del Dominio Toscano, come il Calcarea cavernoso e le filladi del basamento metamorfico, rispetto alle sovrastanti Unità Liguri; è proprio la loro intersezione e la variabilità di composizione litologica, insieme ai processi di interazione fisico-chimica connessi al contatto delle acque sotterranee con le rocce attraversate, ad essere responsabili della circolazione, dell'immagazzinamento e della venuta a giorno delle acque termominerali di Petriolo. Da rilevare ancora che il regime tettonico distensivo ha facilitato la messa in posto, al di sotto delle Unità Toscane metamorfiche e ad una profondità di circa 1.800 m sotto

il livello del mare (Brogi *et al.*, 2005; Tinivella *et al.*, 2005; Brogi & Liotta, 2006), di masse intrusive rappresentanti la sorgente di calore del termalismo (sorgenti calde, emanazioni gassose, ecc.). Dal punto di vista geomorfologico, infine, è da ricordare che i principali dissesti dell'area sono dovuti a fenomeni gravitativi, di tipo "scorrimento rotazionale", su porzioni superficiali più o meno alterate (coltri eluvio-colluviali) del Verrucano e del Calcarea cavernoso riscontrabili lungo corsi d'acqua molto incisi; sui versanti impostati nelle Argille con calcari a palombini, invece, si rilevano prevalentemente fenomeni di erosione calanchiva (in particolare nel tratto settentrionale).

Sistemi di flusso delle acque sotterranee

Gli ammassi rocciosi dell'area di Petriolo mostrano un'elevata eterogeneità composizionale e, soprattutto, una limitata estensione; di conse-

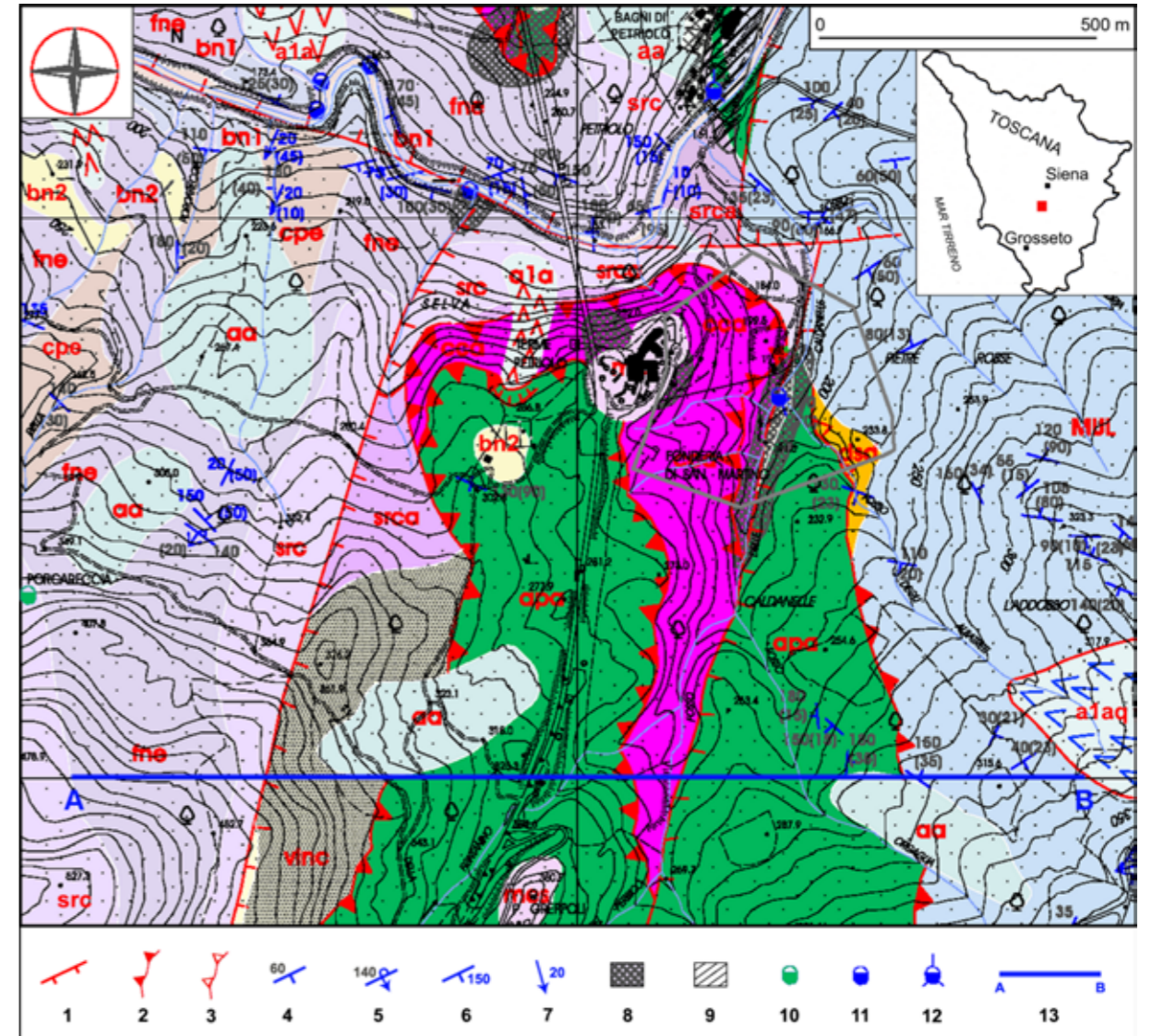


Fig. 1. Carta geologica dell'area di studio (Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000 - Sezione 307120, a cura di Aquè *et al.*, 2005, ripresa con modifiche da Fanti, 2010). DEPOSITI CONTINENTALI POST-VILLAFRANCHIANI: **ala** = frana complessa in evoluzione (Olocene); **alqa** = frana complessa senza indizi di evoluzione (Olocene); **aa** = depositi di versante (Olocene); **bn1** = depositi alluvionali (Pleistocene); **bn2** = depositi alluvionali (Pleistocene). DEPOSITI LACUSTRI E LAGUNARI POST-EVAPORITICI MESSINIANI: **mes** = breccie e conglomerati ad elementi di Calcarea cavernoso (Turoliano sup.). UNITÀ LIGURI: **apa** = argilliti grigie e calcilutiti (Cretaceo inf.); **MUL** = mame (Cretaceo inf.); **dsd** = radiolariti con interstrati argillitici (Malm). FALDA TOSCANA: **cca** = Calcarea cavernoso (Trias sup.). UNITÀ TOSCANE METAMORFICHE: *Verrucano* Auctt. (**vinc** = metacalcari e metacalcari dolomitici, livelli di calcescisti e filladi carbonatiche (Carnico-?Norico); **src** = filladi quarziteo-muscovitiche, con intercalazioni di metaconglomerati e filladi scure (Ladinico sup.-Carnico); **srca** = metaconglomerati quarzosi con matrice quarziteo-filladica (Ladinico sup.-Carnico); *Ciclo mediotriassico inferiore* (**fne** = filladi muscovitiche e muscovitico-quarzitee, localmente con livelli di metarenariee metaconglomerati (Anisico?); *Successione tardo-paleozoica* (**cpe** = siltiti scure e filladi di olistoliti carbonatiche (Viseano sup.-Namuriano). **1** = faglia diretta; **2** = sovrascorrimento di 1° ordine; **3** = sovrascorrimento di 2° ordine; **4** = superficie di origine primaria; **5** = stratificazione a polarità rovescia; **6** = superficie di scistosità o clivaggio; **7** = asse di piega; **8** = zona cataclastica; **9** = zona di alterazione idrotermale; **10** = sorgente fredda; **11** = sorgente termominerale; **12** = pozzo per acqua; **13** = traccia della sezione geologica di Fig. 2.

2. Il termine geotopo è utilizzato diffusamente nell'ambito della gestione del territorio ed indica la più piccola unità spaziale geograficamente omogenea (cioè, una parte del paesaggio con caratteri e struttura relativamente uniformi); i geotopi definiscono quindi unità di territorio spazialmente limitate e distinguibili dalle circostanti essenzialmente in relazione a processi geologici e geomorfologici definiti (Poli, 1999; Moretti *et al.*, 2005).

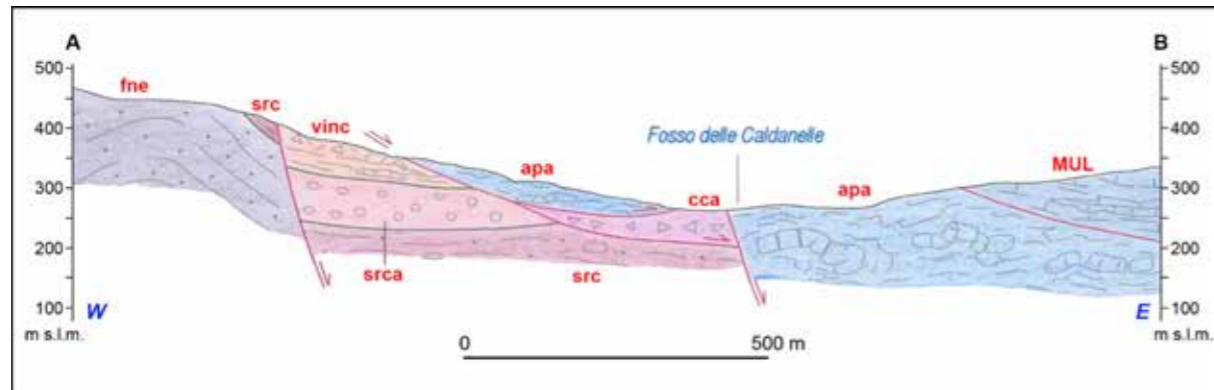


Fig. 2. Sezione geologica la cui traccia è riportata nella Fig. 1 (Carta Geologica Regionale in scala 1:10.000 - Sezione 307120, a cura di Aquè et al., 2005, ridisegnata); per la spiegazione delle simbologie si rimanda alla stessa figura.

guenza, non possono trovarvi sviluppo sistemi di flusso ampi con sorgenti di grossa portata. Qui di seguito sono evidenziate le peculiarità delle unità idrogeologiche distinte (Asticher, 2015):

- il Calcare cavernoso è da considerarsi la principale formazione acquifera in virtù dell'abbondante e diffusa presenza di pori, reticoli fessurativi e condotti di dissoluzione dovuti alle caratteristiche intrinseche della roccia (Gandin et al., 2000). Tutto ciò comporta condizioni di elevata permeabilità secondaria per fessurazione e carsismo, con valori di conducibilità idraulica³ che complessivamente possono arrivare anche a 10^{-4} m/s (Fiocco & Ilardo, 2012);
- nelle Unità Toscane metamorfiche la circolazione idrica sotterranea è quella tipica di un *hard-rock aquifer*, cioè limitata alle porzioni interessate da fessurazione e/o strato di alterazione super-

ficiale. La presenza di una matrice argilloscistosa permette inoltre di definire questi ammassi come acquitardi⁴, i quali localmente possono assumere le caratteristiche di modesti acquiferi, con una conducibilità idraulica variabile fra 10^{-6} e 10^{-7} m/s. Una situazione simile si riscontra nelle Unità Liguri dove la circolazione idrica attiva riguarda solamente la porzione litoide calcarea, con capacità di sostenere sorgenti piccole e irregolari;

- i depositi neogenici e quaternari sono terreni con permeabilità variabile per la diversa porosità efficace⁵. La discontinuità e la limitata estensione non consentono una buona circolazione idrica, salvo la possibile formazione di acquiferi epidermici nella coltre detritica.

Le locali acque sotterranee sono legate a due sistemi di circolazione idrica ben distinti. Il primo, più superficiale, è formato da acque freati-

3. La capacità di una roccia di lasciarsi attraversare dall'acqua, in condizioni normali di temperatura e pressione, viene definita permeabilità. Ad essa corrisponde un parametro che prende il nome di coefficiente di permeabilità o conducibilità idraulica (K); introdotto per la prima volta da H. Darcy nel 1856; tale parametro dipende sia dalla natura del fluido in movimento che dalla natura e conformazione della matrice solida.

4. Acquiferi = Unità idrogeologiche che consentono il moto e l'immagazzinamento dell'acqua; esse ammettono componenti di movimento sia orizzontale (con portate significative verso le opere di captazione) che verticale. Acquitardi = La componente orizzontale è pressoché trascurabile; possono però essere sede di importanti movimenti verticali. Inoltre, se potenti, possono rappresentare importanti serbatoi di immagazzinamento, da cui l'acqua può muoversi in verticale verso gli acquiferi. Acquicludi = Entrambe le componenti di moto sono trascurabili. L'acqua può essere presente sotto forma di ritenzione, non soggetta alla forza di gravità.

5. La porosità efficace corrisponde al volume dei vuoti intercomunicanti contenenti acqua estraibile per gravità in rapporto al volume totale della roccia.

che in stretta relazione con le precipitazioni ed è spesso contraddistinto da un chimismo bicarbonato-alcalino terroso con basse temperatura e salinità; è da sottolineare che alcune acque superficiali, classificabili come solfatiche (spesso calciche), sono relazionabili a semplici processi di interazione con le rocce serbatoio affioranti (Sorgenja Geothermal S.r.l., 2010) come la sorgente fredda Porcareccia (si veda in Fig. 1). Il secondo, più profondo, è legato alle acque meteoriche che attraverso la fratturazione delle rocce raggiungono i serbatoi termali dove subiscono significative variazioni fisico-chimiche (a questo sistema è associata l'emergenza delle acque dei

Bagni di Petriolo e delle Caldanelle); la loro rapida risalita, per spinte termo-artesiane lungo le zone di frattura con direzione appenninica ed antiappenninica, consente di mantenere una composizione solfato-alcalino terroso ed una certa termalità accompagnata da emissioni gassose a CO_2 prevalente (Minissale, 2004).

Le emergenze termali naturali dell'area si riscontrano soprattutto lungo il Farma a monte dei Bagni di Petriolo (si veda in Fig. 1), dove si trova l'opera di captazione (Fig. 3, Foto 3) costituita da due pozzi; tale opera alimenta sia le terme libere che gli stabilimenti Terme di Petriolo e Petriolo Spa Resort. Il pozzo n. 1 ha attraversato litolo-

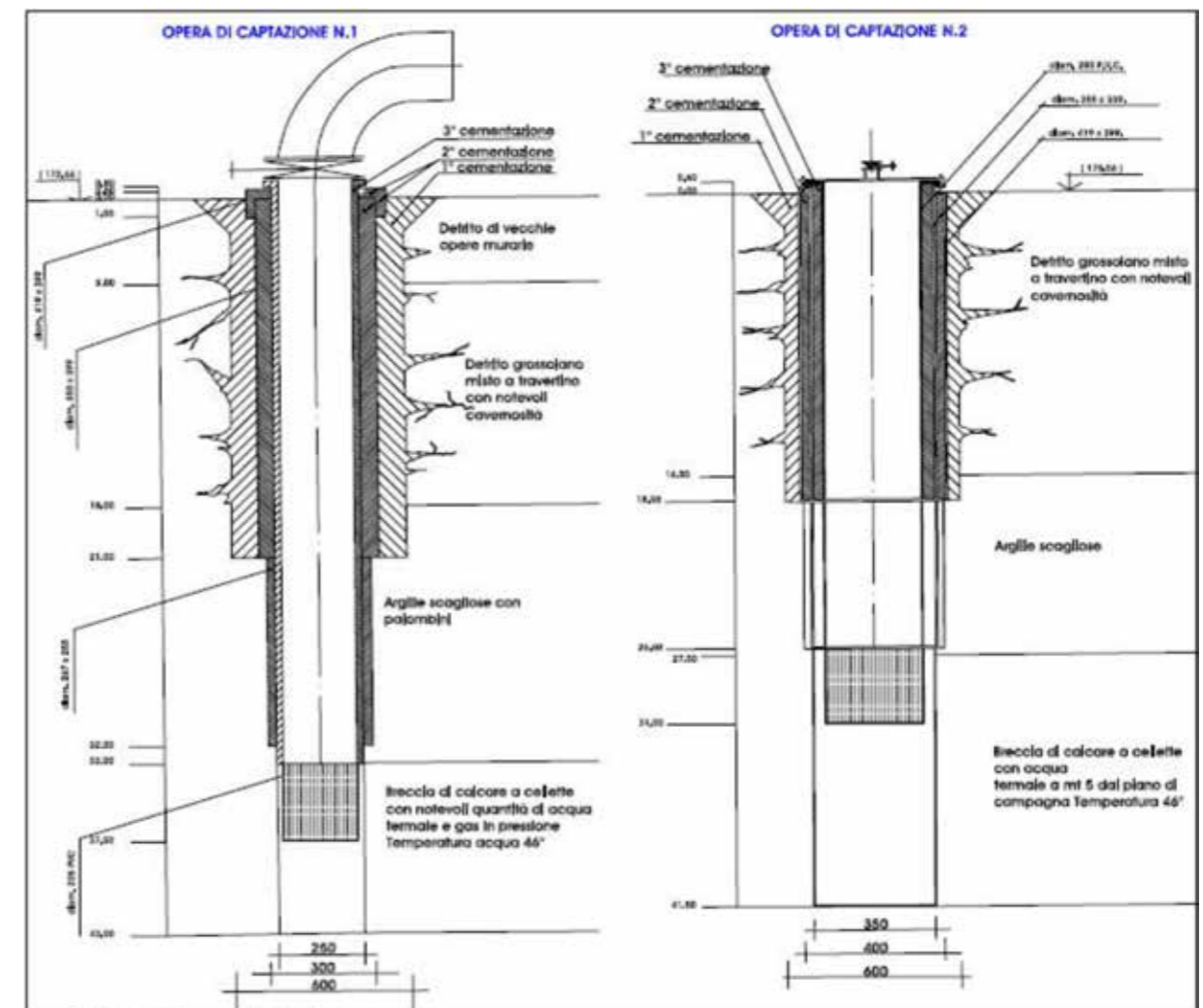


Fig. 3. Stratigrafia delle opere di captazione realizzate a Bagni di Petriolo da Trevisan & Raggi nel 1973 (ripresa da Fanti, 2010); dal pozzo n. 1 fuoriescono le acque termali che alimentano le vasche delle terme libere ed i vicini stabilimenti privati.



Foto 3. L'opera di captazione n. 1 di Bagni di Petriolo da cui fuoriescono le acque termali.

gie travertinose per 18 m, le Argille con calcari palombini fino a 33 m dal piano di campagna e, infine, la breccia di Calcare cavernoso fino a 43 m di profondità; da tale breccia, associata al piano di faglia, scaturirono spontaneamente a livello di boccapozzo circa 40 L/s di acqua termale alla temperatura di 46 °C (Trevisan & Raggi, 1978); la pressione della falda corrispondeva ad un livello piezometrico di 1,70 m sopra il boccapozzo. Poco diversa è risultata la situazione del pozzo n. 2 (portata di poco inferiore, tenendo chiuso il n. 1), per cui esso potrebbe essere utilizzato in alternativa al precedente.

L'altra significativa emergenza naturale è la Sorgente delle Caldanelle, la quale scaturisce in destra idrografica del fosso omonimo (si veda in Fig. 1). L'acqua termale fuoriesce da una frattura del Calcare cavernoso e viene captata da un'opera di presa costituita da un manufatto in cemento armato (Foto 4); una tubazione interrata consente a quest'acqua di attraversare il fosso e di immettersi in un altro manufatto (Foto 5), da cui sorte nuovamente con una portata di circa 8 L/s ed una temperatura di 35 °C (dati relativi al periodo novembre 2013 - gennaio 2015; Asticher, 2015). Essa può essere classificata come sorgente per "soglia di permeabilità sovrainposta" (Civita, 2005), trovandosi il Calcare cavernoso a contatto con la

formazione delle Argille con calcari a palombini tramite una faglia diretta immergente ad est.

Acqua termale è stata riscontrata anche in altri sondaggi effettuati nella zona delle Caldanelle (Fig. 4); alle profondità di circa 40 m e 60-65 m essi hanno messo in evidenza serbatoi nel Calcare cavernoso (e breccia associata) confinati tra formazioni di bassa permeabilità quali le Argille con calcari palombini e le filladi del Verrucano. In tali sondaggi i Professori Trevisan e Raggi dell'Università di Pisa eseguirono nel 1972 alcune prove di emungimento di lunga durata (portata complessiva di 32 L/s) aventi l'obiettivo di verificarne l'impatto sull'erogazione della Sorgente Caldanelle; durante il pompaggio quest'ultima



Foto 4. Opera di captazione della sorgente termale delle Caldanelle.



Foto 5. Manufatto, in sinistra idrografica, dal quale escono le acque termali della Sorgente Caldanelle.

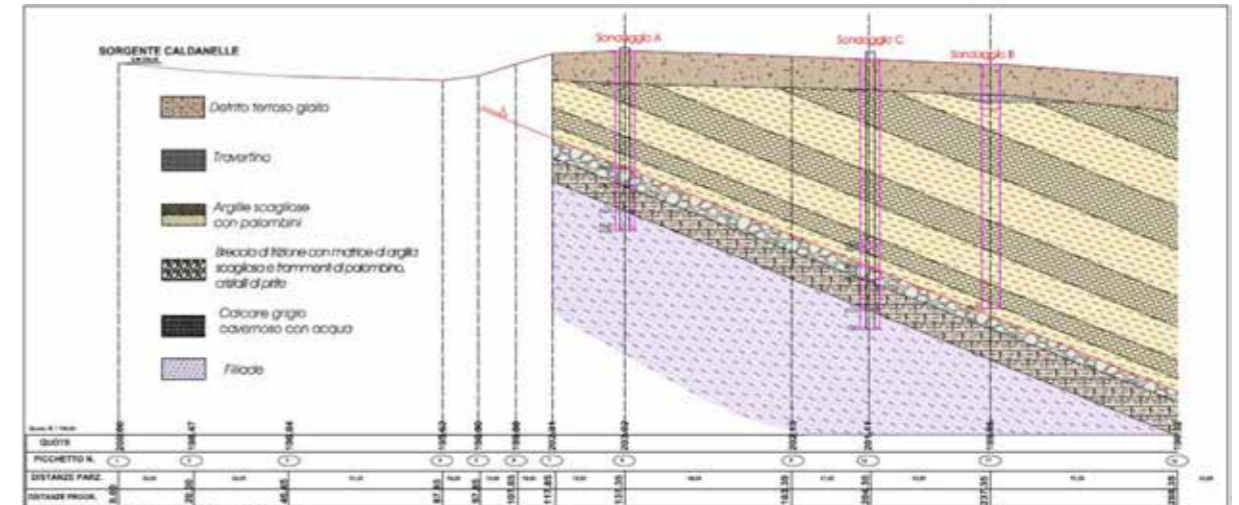


Fig. 4. Sezione geologica ricostruita da Trevisan & Raggi nel 1972 tramite sondaggi effettuati in località Le Caldanelle (ripresa da Fanti, 2010).

diminuirà la portata fino ad esaurirsi totalmente, a dimostrazione che la sua alimentazione proveniva direttamente dai sistemi di flusso presenti nel Calcare cavernoso.

In definitiva, secondo le risultanze ottenute dalle varie indagini, Trevisan & Raggi (1978) affermarono che *“le acque termali dei Bagni del Petriolo provengono da una circolazione profonda, in pressione, che risale in superficie lungo una grande faglia con piano inclinato verso est. Tale discontinuità tettonica è caratterizzata dalla presenza sui due lati di formazioni molto diverse fra loro, per età e caratteristiche litologiche, rappresentate dalle filladi del Verrucano a ovest e un complesso di argille scagliose con intercalazioni di strati calcarei a est. Tra queste due pareti impermeabili l'acqua termale risale attraverso la breccia di frizione della faglia costituita in prevalenza da calcari, facenti parte della formazione del Calcare cavernoso”*.

Seguendo l'approccio di Gargini *et al.* (2008), la Sorgente Caldanelle rientra tra i “Sistemi di flusso regionali di bassa quota” che sono caratterizzati da portate importanti ed alimentati da strutture tettoniche regionali; le emergenze termali, che scaturiscono dal Verrucano lungo il T. Farma a monte del viadotto, sono classificabili invece come “Sistemi locali di flusso di minor grado gerarchico di bassa quota” in quanto mostrano una limitata espansione areale e portate ridotte (Asticher, 2015). Per confronto, la Sorgente Por-

carecchia è da definirsi una sorgente per “limite di permeabilità indefinito” (Civita, 2005), trovandosi in un complesso litologicamente omogeneo come il Verrucano ed essendo quindi associata ad una zona a permeabilità maggiore, rispetto all'intorno, dovuta a una maggiore fratturazione; essa rientra tra i “Sistemi locali di flusso di versante” dove si posizionano sorgenti di piccola e media portata (max 1 L/s).

Aspetti geochimici delle acque termominerali

Le analisi chimiche effettuate nel tempo sull'acqua risalente nel pozzo dei Bagni di Petriolo (Fig. 5) indicano una facies tipicamente solfato-bicarbonato-calcico-magnesiaca (la componente dominante è costituita dalla coppia ionica $Ca^{++}SO_4^-$) con una buona stabilità composizionale (ARPAT, 2014); i dati del contenuto in ione solfato mostrano concentrazioni medie superiori a 1.500 mg/L, mentre quelle dello ione calcio rimangono intorno a 800 mg/L. Tale chimismo è comunemente interpretato come il riflesso di una circolazione idrica nelle formazioni carbonatico-anidritiche del Mesozoico della Serie Toscana, quali la Formazione anidritica di Burano - Calcare cavernoso (Bencini *et al.*, 1977; Panichi, 1982; Minissale *et*

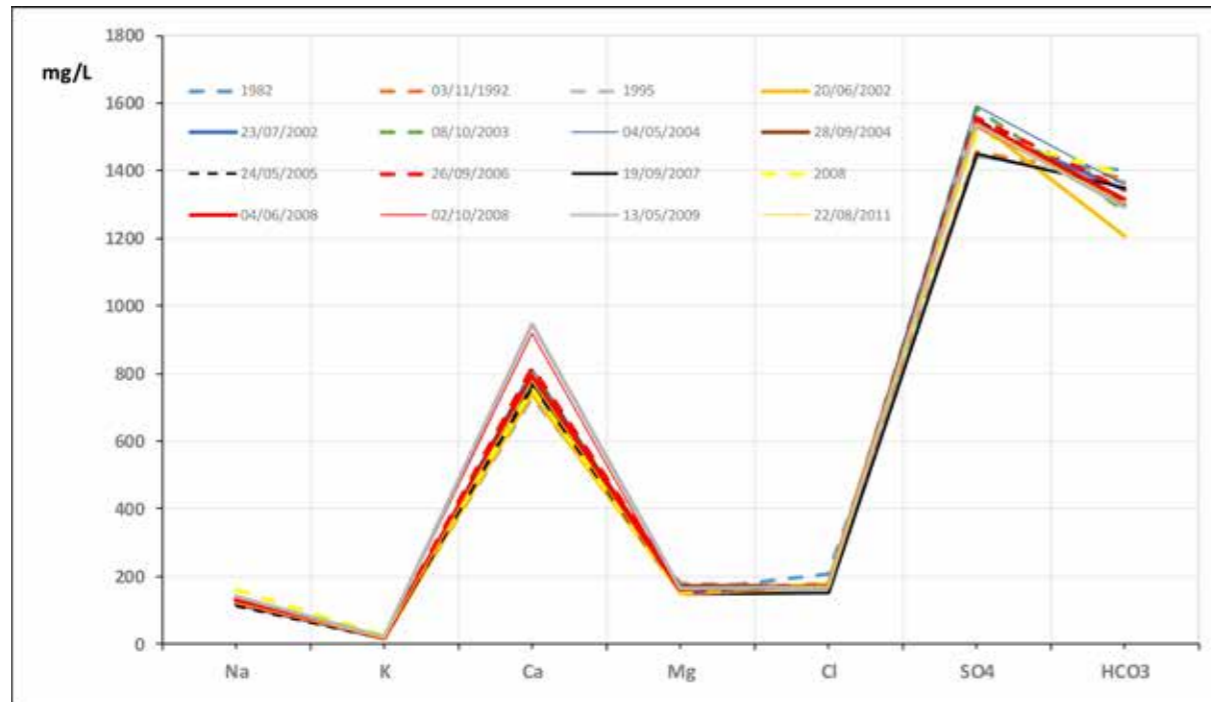


Fig. 5. Andamento temporale delle concentrazioni degli ioni maggiori nell'acqua termominerale emergente dal pozzo dei Bagni di Petriolo. Dati ripresi da Panichi (1982), Baldi (2013) e ARPAT (2014).

al., 1997); altri esempi molto noti di questo tipo sono costituiti dalle sorgenti di Bagno Vignoni e delle Terme di Saturnia.

Anche la composizione chimica dell'acqua della Sorgente Caldanelle ricade nel campo solfato-calcico, con valori medi degli ioni solfato e calcio rispettivamente intorno a 1.200 mg/L e 500 mg/L, per cui può essere interpretata come il riflesso di un'analogia circolazione idrica. Il confronto con le risultanze analitiche dei Bagni di Petriolo (Fig. 6) consente però di evidenziare che quest'ultime presentano una maggiore salinità totale (circa 4,1 g/L rispetto a 2,1 g/L) e soprattutto un più alto contenuto di sodio, potassio e cloruri, indicativi di un circuito più profondo e di una risalita rapida caratterizzata da mescolamenti trascurabili con acque appartenenti a circuiti più superficiali. Al contrario, le acque delle Caldanelle subiscono un miscelamento con acque epidermiche più fredde

(di natura meteorica recente), circolanti nel Calcare cavernoso, che provoca anche un abbassamento della temperatura di emergenza (35 °C, rispetto ai 46 °C dei Bagni di Petriolo); ciò è avvalorato pure dal comportamento della portata, che è soggetto a periodi di morbida (massima circa 15 L/s) e di magra (minima circa 4 L/s) influenzati dalle precipitazioni meteoriche stagionali (dati relativi al periodo novembre 2013 - gennaio 2015; Asticher, 2015). Queste differenti composizioni chimiche si riflettono nelle diverse deposizioni di sali all'emergenza; infatti, le acque dei Bagni di Petriolo provocano marcate concrezioni calcaree intorno al boccapozzo (zona terme libere), mentre quelle delle Caldanelle non presentano alcun tipo di deposito calcareo né in corrispondenza dell'opera di presa, né nelle sue immediate vicinanze.

Le composizioni chimica ed isotopica delle acque termominerali del *Graben*⁶ di Siena-Radi-

6. Termine proveniente dalla letteratura scientifica tedesca che in geologia strutturale indica una fossa tettonica, ovvero una porzione di crosta terrestre sprofondata a causa di un sistema di faglie dirette (o normali) in regime tettonico distensivo. Tra due fosse adiacenti si distingue una zona di crosta terrestre relativamente sollevata chiamata *Horst* (o pilastro tettonico).

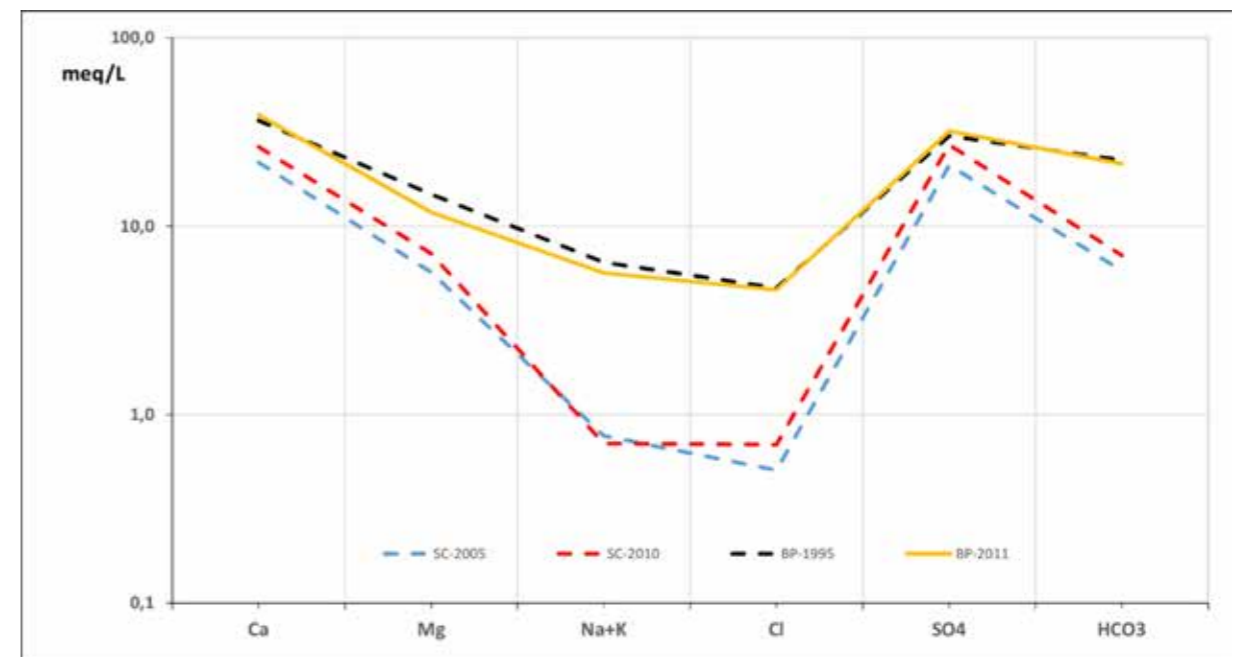


Fig. 6. Confronto tra le composizioni chimiche delle acque dei Bagni di Petriolo (BP) e della Sorgente Caldanelle (SC). Dati ripresi da Fanti (2010), Baldi (2013) e ARPAT (2014).

cofani (Panichi *et al.*, 1979; Panichi, 1982), nel quale ricadono quelle della zona di Petriolo, indicano che le diverse emergenze derivano da circolazioni idriche profonde sostanzialmente differenti e relazionabili con le caratteristiche idrogeologiche dei vari settori della struttura, pur avendo tutte una comune origine meteorica. In sintesi (Fig. 7):

- sui fianchi del *Graben* si sviluppano circolazioni idriche nelle serie permeabili costituite dalle formazioni carbonatico-anidritiche mesozoiche della Falda Toscana e, in minor misura, dall'Unità di Monticiano-Roccastrada (rappresentata essenzialmente dal Verrucano); queste circolazioni possono interessare solo marginalmente la fossa poiché alimentano numerose sorgenti con chimismo sia bicarbonato-calcico, come quelle di S. Giovanni (Rapolano Terme), che solfato-calcico come quelle di Petriolo, dell'Acqua Santa (Chianciano) e di Bagno Vignoni (S. Quirico d'Orcia);
- dagli stessi fianchi, ed in particolare da quello sud-occidentale, si sviluppa anche una circola-

zione idrica relativamente più profonda che va ad interessare le rocce del basamento cristallino e che alimenta alcune sorgenti, di varia termalità e con chimismo clorurato-alcino, localizzate sia all'interno del *Graben* (ad esempio, l'Acqua Borra di Castelnuovo Berardenga) che ai suoi limiti sud-occidentali (ad esempio, le sorgenti Mortaione di Monticiano e Collalli di Montalcino) e perciò denominate "acque del *Graben*" da Panichi *et al.* (1979). Secondo Duchi *et al.* (1992), il chimismo di queste sorgenti interne non dipende dall'interazione con le rocce del basamento, ma rappresenta il risultato del miscelamento tra acque provenienti dalle formazioni carbonatico-anidritiche ed acque marine fossili contenute negli spessi sedimenti argillosi marini del Pliocene.

Questa differenza esistente nella profondità dei vari circuiti si traduce non solo in una differenziazione dei contenuti salini delle acque termominerali, ma anche in una sostanziale diversità delle temperature che esse hanno assunto in profondità; le composizioni chimiche e isotopiche delle acque

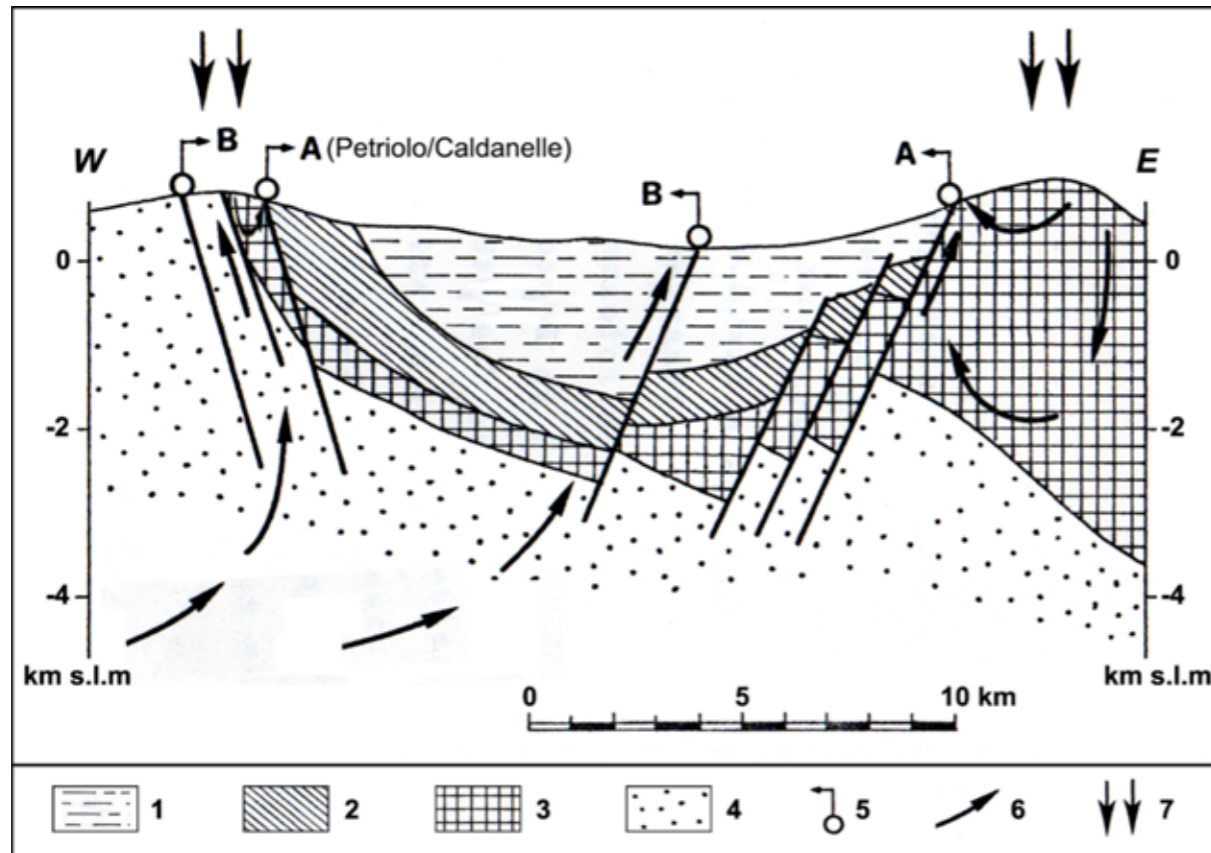


Fig. 7. Sezione geologica schematica del Graben di Siena-Radicofani (Panichi *et al.*, 1979, modificata): **1** = argille e sabbie prevalenti del ciclo sedimentario neogenico (Miocene superiore - Pliocene); **2** = formazioni prevalentemente flyschoidi (Giurassico superiore - Eocene); **3** = rocce carbonatiche-anidritiche (Triassico superiore - Giurassico); **4** = filladi, scisti e quarziti del basamento cristallino regionale (Paleozoico - Triassico superiore); **5** = sorgente termominerale; **6** = circolazione idrica più o meno profonda; **7** = ricarica meteorica. A = acque dei margini occidentale e orientale; B = acque del Graben.

emergenti dal pozzo dei Bagni di Petriolo consentono di stimare valori dell'ordine di 80 °C e comunque inferiori a 150 °C (Panichi, 1982). Infine, il loro tenore in trizio⁷ permette di ritenere che il percorso sotterraneo dalle zone di ricarica all'emergenza è stato compiuto in un arco temporale di almeno 40 anni (Battaglia *et al.*, 1992; Minissale *et al.*, 1997).

Conclusioni

Nella Toscana meridionale è presente un gran numero di sorgenti termominerali, la cui origine

dipende dai particolari circuiti idrogeologici: le acque meteoriche penetrano e circolano in profondità assumendo calore dal contatto con gli strati sempre più caldi e prendendo in carico, per dissoluzione, sostanze varie. Il contenuto minerale ed il livello termico, così acquisiti, vengono talvolta conservati pressoché totalmente dall'acqua fino alla sua emergenza in superficie che avviene solitamente lungo faglie. Sono quindi le rocce serbatoio, tramite le proprie caratteristiche mineralogiche ed il concorso di altre variabili come pressione, temperatura e tempo di contatto, a determinare le specifiche composizioni chimiche di queste acque.

7. Il trizio (o tritio) è l'isotopo radioattivo dell'idrogeno (³H), con tempo di dimezzamento pari a 12,43 anni; esso viene utilizzato per calcolare l'età relativa dei campioni (cioè, del tempo intercorso dalla separazione dal sistema atmosferico), in quanto presente in elevate concentrazioni nelle acque più giovani, coprendo un intervallo teorico di circa 50 anni.

A partire dalla prima intuizione di Trevisan (1951), gli studi successivi hanno dimostrato che la genesi tipica delle acque termominerali toscane è sostanzialmente da ricondurre alla concomitante presenza dei seguenti elementi (ARPAT, 2014):

- un importante serbatoio idrico nella serie carbonatica mesozoica. La buona (o l'elevata) permeabilità per fessurazione e carsismo, che questa mostra, facilita la ricarica meteorica diretta in corrispondenza dei nuclei affioranti;
- un flusso di calore terrestre, derivante dal locale gradiente geotermico (normale o anomalo), a cui può aggiungersi il calore prodotto dalla reazione esotermica dovuta all'idratazione e trasformazione in gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dell'anidrite che si trova alla base della serie carbonatica;
- vie preferenziali per le correnti ascendenti del flusso convettivo idrotermale. Esse sono rappresentate da faglie distensive post-orogeniche,

le quali spesso portano in affioramento anche i nuclei mesozoici.

Queste emergenze, pertanto, sono da considerarsi strettamente legate alle formazioni carbonatiche-evaporitiche del Mesozoico della Serie toscana non metamorfica; Bencini *et al.* (1977) hanno evidenziato, ad esempio, come rappresentando in un diagramma le temperature rispetto al contenuto in solfati, la maggior parte delle sorgenti toscane mostri una chiara correlazione dei due parametri.

Per molto tempo, e comunque ancora oggi, le sorgenti termominerali sono state osservate e studiate soprattutto sotto il profilo di acque da utilizzare per scopi terapeutici. Una visione finalizzata quasi esclusivamente alla "sfera sanitaria" ha però ostacolato una loro collocazione in un contesto scientifico più ampio. Con il presente articolo, dedicato alla conoscenza e alla tutela delle risorse idriche sotterranee di una zona ad elevato valore paesaggistico ed ambientale come quella di Petriolo, si è cercato di contribuire a colmare questa lacuna.

Testi citati

- Aldinucci M., Brogi A. & Spina A. (2008) - *Middle-Late Permian sporomorphs from the Farma Formation (Monticiano-Roccastrada Ridge, southern Tuscany): new constraints for the tectono-sedimentary history of the Tuscan Domain*. Boll. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), 127: 581-597.
- Aquè R., Bellagotti E., Costantini A., Decandia F.A., Lazzarotto A. & Sandrelli F. (2005) - *Foglio 307-Roccastrada - Sezione 307120*. Carta Geologica Regionale a scala 1:10.000 della Regione Toscana.
- ARPAT (2014) - *Principali emergenze termali in Toscana: idrogeologia e chimica delle acque*. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, 378 pp.
- Asticher G. (2015) - *Monitoraggio di sorgenti e verifica della potenziale interferenza idrogeologica di una galleria: il caso della tratta stradale Grosseto-Siena*. Tesi di Laurea Magistrale inedita, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali dell'Università degli Studi di Bologna, A.A. 2014-2015 (Relatore: Prof. A. Gargini), 138 pp.
- Baldi A.M. (2013) - *Nota circa le emergenze termali presenti*. Relazione inedita per conto della Terme di Petriolo S.p.A (Monticiano, Siena), 26 pp.
- Barazzuoli P., Guasparri G. & Salleolini M. (1993) - *Il clima*. In: La storia naturale della Toscana meridionale, Pizzi Ed., Milano, 140-171.

Battaglia A., Ceccarelli A., Ridolfi A., Frohlich K. & Panichi C. (1992) - *Radium isotopes in geothermal fluids in central Italy*. Proc. Int. Symp. on Isotope Techniques in Water Resources Development, I.A.E.A., 11-15 March 1991, Vienna, 363-383.

Bencini A., Duchi V. & Martini M. (1977) - *Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)*. Chemical Geology, 19: 229-252.

Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D. & Ranalli G. CROP-18 Working Group (2005) - *Crustal structures in the geothermal areas of southern Tuscany (Italy): insights from the CROP-18 deep seismic reflection lines*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 148: 60-80.

Brogi A. & Liotta D. (2006) - *Understanding the crustal structures of southern Tuscany: the contribution of the CROP-18 Project*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 47: 401-423.

Cambria V. (2013) - *Alla scoperta delle Terme di Petriolo. Capitolo I° - Cenni Storici*. Italia Nostra Siena, 10 marzo 2013.

Civita M. (2005) - *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 794 pp.

Costantini A., Decandia F.A., Lazzarotto A. & Sandrelli F. (1988) - *L'Unità di Monticiano-Roccastrada fra la Montagnola Senese e il Monte Leoni (Toscana meridionale)*. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, 31: 382-420.

Costantini A., Lazzarotto A., Stanghellini G. & Tavarnelli E. (2015) - *I Canaloni e la formazione di Poggio al Carpino*. In

Costantini A. (a cura di): Geotopi di importanza regionale nelle province di Siena e Grosseto. Pacini Ed., Pisa, 115-121.

Duchi V., Minissale A., Paolieri M., Prati F. & Valori A. (1992) - *Chemical relationship between discharging fluids in the Siena-Radicofani Graben and the deep fluids produced by the geothermal fields of Mt. Amiata, Torre Alfina and Latera (Central Italy)*. Geothermics, 21(3): 401-413.

Engelbrecht H. (2008) - *Carboniferous continental margin deposits in southern Tuscany, Italy: results from geological mapping of the geotopes FarmaValley and San Antonio Mine Area*. Geological Journal, 43: 279-305.

Fanti M. (2010) - *Studio degli aspetti geologici, geofisici, idrogeologici e idrochimici, relativo al permesso di ricerca di acqua termale denominato "Le Caldanelle di Petriolo" in località Petriolo*. Relazione inedita per conto della società Athens R.E. Fund SAI Investimenti SGR S.p.A. secondo quanto prescritto dal Permesso di Ricerca rilasciato dalla Regione Toscana (Decreto Dirigenziale n. 3640 del 29 luglio 2009), 42 pp.

Fiocco M. & Ilardo I. (2012) - *Relazione geologica, indagini e rilievi, geologia e idrogeologia*. Relazione inedita per conto dell'ATI Strabag S.p.A. - Intercantieri Vittadello S.p.A. relativa alla realizzazione dell'opera "Itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto-Fano - Adeguamento a 4 corsie nel tratto Grosseto-Siena (S.S. 223 di Paganico) dal km 30+040 al km 41+600 - Lotti 5, 6, 7, 8".

Gandin A., Giamello M., Guasparri G., Mugnaini S. & Sabatini G. (2000) - *The Calcare Cavernoso of the Montagnola Senese (Siena, Italy): mineralogical-petrographic and petrogenetic features*. Miner. Petrogr. Acta 43: 271-289.

Gargini A., Vincenzi V., Piccini L., Zuppi G.M. & Canuti P. (2008) - *Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage*. Hydrogeology Journal, 16: 1577-1599.

Lazzarotto A., Aldinucci M., Cirilli S., Costantini A., Decandia F.A., Pandeli E., Sandrelli F. & Spina A. (2003) - *Stratigraphic correlation of the Upper Palaeozoic-Triassic successions in Tuscany, Italy: a review*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. Spec. 1: 25-35.

Marotta D. & Sica C. (1929) - *Classificazione delle acque minerali italiane*. Giornale di Chimica industriale ed applicata, 11(6), 276 pp.

Minissale A. (2004) - *Origin, transport and discharge of CO₂ in central Italy*. Earth Science Review, 66: 89-141.

Minissale A., Magro G., Vaselli O., Verrucchi C. & Perticone I. (1997) - *Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 79: 223-251.

Moretti S., Reale V. & Rossi R. (2005) - *I geositi di importanza regionale ai sensi della legge regionale toscana*. Acta apuana, Suppl. IV, 53-58.

Panichi C. (1982) - *Aspetti geochimici delle acque termali*. In: Il Graben di Siena, CNR-PFE, SPEG, RF 9, Pisa, settembre 1982, 61-72.

Panichi C., D'Amore F., Fancelli R., Noto P. & Nuti S. (1979) - *Interpretazione del rilevamento geochimico delle acque e delle manifestazioni gassose della Provincia di Siena*. Energia Geotermica: prospettive aperte dalle ricerche del CNR, PFE-SPEG, Atti del 1° Seminario Informativo, Roma, 18-21 dicembre 1979, 450-469.

Poli G. (1999) - *Geositi, testimoni del tempo. Fondamenti per la conservazione del patrimonio geologico*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, 259 pp.

Sorgenia Geothermal S.r.l. (2010) - *Regione Toscana. Istanza di permesso di ricerca di risorse geotermiche "Murlo". Allegato F2 - Relazione tecnico-geologica*. Relazione inedita per ottenere il permesso di ricerca ai sensi del D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 e dell'art. 8 del D.P.R. 395 del 27 maggio 1991, 100 pp.

Studio Mattioli S.r.l. (2012) - *Monitoraggio ambientale ante-operam fauna: relazione tecnica*. Relazione inedita per conto dell'ATI Strabag S.p.A.-Intercantieri Vittadello S.p.A. relativa alla realizzazione dell'opera "Itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto-Fano - Adeguamento a 4 corsie nel tratto Grosseto-Siena (S.S. 223 di Paganico) dal km 30+040 al km 41+600 - Lotti 5, 6, 7, 8", 52 pp.

Thorntwaite C.W. (1948) - *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, 38: 55-94.

Tinivella U., Accaino F., Rossi G. & Nicolich R. (2005) - *Petrophysical analysis of CROP-18 crustal seismic data*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. Spec., 3: 205-211.

Trevisan L. (1951) - *Una nuova ipotesi sull'origine della termalità di alcune sorgenti della Toscana*. L'industria mineraria, 2: 41-42.

Trevisan L. & Raggi G. (1978) - *Relazione idrogeologica sulle sorgenti termominerali di Petriolo*. Relazione inedita per conto della SAGIM S.p.A. (Grosseto), 9 pp.

«Heri mattina principassemo a tuore el bagno». Quando i Gonzaga venivano a Petriolo

Riccardo Bassani

Via dell'Arco, 1 – Loc. Iesa, Monticiano

Un lunedì sul finire del mese d'aprile del 1460, alle prime ore del mattino, si abbassò il ponte levatoio del castello di San Giorgio, quello verso il centro della città di Mantova, che di lì a poco venne attraversato da una lunga cavalcata di signori e dignitari di corte, seguita da carri e muli carichi all'inverosimile. A guidare quel lungo corteo il marchese Ludovico III in persona¹, che i sudditi e gli altri signori del tempo giudicavano un principe abile nelle armi, colto e prudente, ma soprattutto integro e leale e che poneva sopra ogni considerazione il proprio onore, la fedeltà agli impegni presi e il bene della sua casata e della sua città (Foto 1-3). Uno per parte al suo fianco cavalcavano Federico, il suo primogenito (Foto 2, 4)², e un bambino di soli otto anni, Rodolfo (Foto 5)³, il settimo dei dieci figli che il marchese aveva avuto dalla consorte Barbara di Brandeburgo⁴, donna di grande cultura, che amava le arti e che ebbe

un ruolo non secondario nel fare della piccola corte mantovana uno dei più importanti centri dell'arte e della cultura rinascimentale. Non era bella la marchesa, aveva tratti energici e quasi maschili per i quali si era meritata il soprannome di «virago» (Foto 6).

Insieme ai loro signori, un folto gruppo di segretari, cancellieri, medici e famigli di ogni genere e stato completava il corteo. Attraversata la città fra ali di folla venuta a salutare il principe in partenza, la lunga carovana prese la strada per Mirandola per affrontare il lungo viaggio che di lì a una decina di giorni avrebbe portato il signore e i suoi dignitari a trascorrere un periodo di cure presso i Bagni di Petriolo, il complesso termale allora rinomatissimo sulla strada che da Siena porta in Maremma.

Siamo a conoscenza di questo viaggio e dei giorni trascorsi ai bagni, nonché di quello che accadde durante il soggiorno di cure, come

1. Ludovico III Gonzaga (Mantova, 5 giugno 1412 – Goito, 11 giugno 1478), figlio di Gian Francesco I Gonzaga e di Paola Malatesta, dal 1444 secondo marchese di Mantova.

2. Federico I (Mantova, 2 luglio 1441 – Ivi, 14 luglio 1484), terzo marchese di Mantova.

3. Rodolfo Gonzaga (Mantova, 18 aprile 1452 – Fornovo, 6 luglio 1495), quintogenito di Ludovico III e Barbara, fu il capostipite dei Marchesi di Castiglione.

4. Barbara di Hohenzollern (30 settembre 1422 – Mantova, 7 novembre 1481), figlia primogenita di Giovanni detto l'Alchimista, figlio del margravio di Brandeburgo Federico I e di Barbara di Sassonia. Con il permesso dell'imperatore, Sigismondo di Lussemburgo, di cui Barbara era nipote, giunse all'età di appena 11 a Mantova dove nel mese di novembre con il fasto e la pompa tipiche di una corte italiana del Rinascimento, si svolsero le cerimonie nuziali con Ludovico III. Data la sua giovanissima età, il marchese Gian Francesco la fece educare insieme ai propri figli da Vittorino da Feltre sotto la cui guida Barbara acquistò quella cultura e quella saggezza pratica che più tardi l'avrebbero resa famosa e che le era senza dubbio riconosciuta, oltre che dal marito e dai figli, anche dai parenti e dai dignitari di corte, come risulta evidente dai toni che ognuno di loro usava nelle lettere che le indirizzava.



Foto 1. Camera degli sposi: la corte, Andrea Mantegna, Mantova, Palazzo Ducale, 1474, particolare.

pure dell'analogo viaggio intrapreso l'anno successivo dal fratello del marchese, Alessandro (Foto 7)⁵, grazie ad alcune lettere indirizzate dal signore di Mantova, dai suoi figli e da alcuni dei suoi dignitari, alla Marchesana Barbara, restata a casa a occuparsi delle faccende dello Stato. L'ampio carteggio fu per la prima volta pubblicato nel lontano 1869 da Attilio Portioli⁶, sacerdote mantovano e direttore del Museo Civico cittadino, riconosciuto studioso della storia del ducato. Lettere che ci svelano piccoli fatti quotidiani occorsi ai vari personaggi, ci danno conto dei luoghi visitati, delle accoglienze ricevute, delle personalità incontrate durante il lungo cammino, degli eventi acca-

duti, attesi o temuti riguardanti questioni politiche e militari che stavano maturando in quei giorni, e, infine, delle cure alle quali, ai bagni, si sottoposero il marchese e i suoi figli e l'anno successivo il signore di Castel Goffredo, sempre sotto l'attento controllo dei medici al seguito. Ma sono anche lettere che ci fanno conoscere particolarità del carattere dei personaggi e ci permettono di accedere alla serenità e alla leggerezza dei rapporti che intercorrevano fra loro e ai sentimenti di devozione, di rispetto, di amore, di complicità che dovevano caratterizzare la vita della famiglia marchionale e della corte tutta di Mantova, derivati senz'altro dal fondamentale insegnamento che ognuno di

5. Alessandro Gonzaga (Mantova, 26 agosto 1427 – Ivi, 16 gennaio 1466) era il terzo figlio di Gian Francesco I. Educato da Vittorino da Feltre, ne divenne l'allievo prediletto e fu letterato amante del greco e del latino. Alla morte del padre, nel 1444, ereditò le terre di Castel Goffredo assieme ad altri possedimenti minori. Nel 1446 sposò Agnese da Montefeltro, figlia di Guidantonio conte di Urbino e di Caterina Colonna, sorella del cardinal Prospero, anch'egli assiduo frequentatore dei bagni.

6. A. Portioli, *I Gonzaga ai bagni di Petriolo di Siena nel 1460 e 1461*, Mantova, Stab. Tip. Eredi Segna, 1869.

loro aveva ricevuto anni prima da Vittorino da Feltre alla *Ca' Zoiosa*⁷.

Era stata quella un'esperienza pedagogica di altissimo livello, cui i giovani Gonzaga, maschi e femmine, parteciparono insieme con una serie cospicua di condiscipoli, sia mantovani sia stranieri, dalla quale uscirono uomini politici, prelati e umanisti di rilievo. Vittorino Rambaldoni, infatti, giunto a Mantova dopo avere insegnato a Padova e a Venezia, fu una particolarissima figura di educatore. Lo sviluppo intellettuale dei suoi allievi, basato sull'apprendimento del latino e del greco, della dialettica e della retorica, della filosofia, della matematica, della musica, non andava disgiunto nella sua dottrina da uno sviluppo armonioso del corpo e da un'educazione etica all'equilibrio, alla frugalità, a un retto sentire cristiano. Tale espe-

rienza educativa andava condivisa fra tutti coloro che ne risultassero meritevoli, indipendentemente dal rango: in tal senso, i figli dei marchesi crebbero sobriamente e a contatto con compagni di varia origine, con cui sovente mantennero rapporti significativi per tutta la vita. In particolare Ludovico, che da Francesco Prendilacqua⁸, discepolo e biografo di Vittorino, sappiamo fosse goffo, impacciato nei movimenti e tendente alla pinguedine, venne gradualmente educato a controllare il proprio regime di vita, abituando il corpo a una parca disciplina che lo caratterizzò anche negli anni maturi. Si trattò, per lui, di un magistero di grande peso: grazie a Vittorino, il futuro marchese maturò non solo un'educazione equilibrata e rigorosa, ma capacità intellettuali di prim'ordine e un amore peculiare per le discipline umanistiche.



Foto 2. Camera degli sposi: l'incontro, Andrea Mantegna, Mantova, Palazzo Ducale, 1474.



Foto 3. Ludovico III Gonzaga, particolare da Camera degli sposi: la corte.

7. Vittorino de' Rambaldoni (Feltre, 1373 o 1378 – Mantova, 2 febbraio 1446).

8. Francesco Prendilacqua (Mantova, 1420 ca. – ante 2 giugno 1499), cittadino mantovano, scolaro di Vittorino da Feltre, sul quale scrisse l'operetta *De vita Victorini feltrensis. Dialogus Francisci Prendilacqua Mantuani* che fu edita a Padova nel 1774.



Foto 4. Federico I Gonzaga (a destra) a colloquio con Federico III di Asburgo e Cristiano I di Danimarca, particolare da *Camera degli sposi: l'incontro*.

I Gonzaga erano assidui frequentatori dei Bagni di Petriolo. Lo si deduce da una delle lettere inviate da Alessandro Gonzaga alla cognata⁹ che, chiedendosi se riuscirà a sopportare il soggiorno, visto che le giornate trascorrono «cum gran fatica e noja», aggiunge di non ricordarsi l'effetto che su di lui avevano fatto i giorni lì passati le volte precedenti, perché «seranno 14 anni ge fui la ultima volta», riferendosi perciò al 1447, quando di anni ne aveva 20¹⁰. Tuttavia l'andata ai Bagni del 1460 era stata sollecitata dal consiglio dato al marchese da Bartolomeo Manfredi, l'astrologo di corte¹¹ (Foto 8), che non solo aveva raccomandato al suo signore di intraprendere quel viaggio e quelle cure, ma aveva persino suggerito l'ora più propizia per la partenza:

«Hora Illustrissima Madonna – si rallegrerà Zaccaria dei Saggi, cancelliere del marchese, in una delle sue lettere¹² – sia benedetto quello divino astrologo che ellesse una così felice e ben fortunata hora per lo nostro Illustrissimo Signore nel suo partire, mediante el favore de la quale Sua Illustrissima Signoria con tuta sua famiglia è giunta a salutifero porto»¹³.

9. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 6 maggio 1461.

10. Ivi, *passim*.

11. Sotto il governo di Ludovico III Gonzaga, l'astrologo senza dubbio più accreditato a corte fu Bartolomeo Manfredi (Mantova? – Ivi 1478). Che questa scienza fosse notevolmente legata a quella medica è attestato da una lettera riguardante l'infermità del Marchese Ludovico che lo spaventò sì tanto da ritenerla il risultato di una cattiva influenza delle stelle e di un cattivo servizio del suo astrologo che non lo aveva avvertito per tempo (e che, probabilmente, fu origine del suo viaggio a Petriolo). Pronostici di natura diversa si susseguirono negli anni e adempirono a previsioni oltre che mediche anche politiche. Il Manfredi è noto soprattutto per aver realizzato, su incarico del marchese Ludovico III, il famoso orologio, terminato nel 1473, con i segni dello Zodiaco e collocato sulla torre nella piazza dei Mercadanti (attuale piazza delle Erbe). L'orologio indicava le ore ordinarie, degli astrologi e dei pianeti, il percorso del sole attraverso lo Zodiaco e le fasi lunari.

12. Zaccaria dei Saggi fu agente dei marchesi Ludovico e Federico Gonzaga e corrispondente di Ercole d'Este: ebbe, ad esempio, l'incarico nel 1453 di convincere i veneziani a cessare le ostilità con Milano e Mantova; nel 1468 presentò a Galeazzo Maria Sforza le condoglianze ufficiali per la morte della duchessa Bianca Maria, e nel 1470 venne congedato da quel duca per non essere riuscito a ricondurre i due signori di Mantova al soldo milanese. La sua piccola fama è però legata a un evento drammatico in cui ebbe la ventura di trovarsi coinvolto: nelle sue braccia spirò infatti, il 26 dicembre 1476, Galeazzo Maria Sforza, vittima dell'attentato di Olgiati, Visconti e Lampugnano, la cui dinamica egli stesso raccontò al marchese Ludovico in una lettera datata 26 dicembre 1476, pubblicata da A. Bertolotti, *Spedizioni militari in Piemonte sconosciute o poco note di Galeazzo Maria Sforza duca di Milano*, Milano, 1883, pp. 57-8.

13. Lettera di Zaccaria Seggi alla marchesana Barbara del 9 maggio 1460.

Non è, tuttavia, da escludere che il consiglio dell'astrologo fosse stato suggerito dalla stessa Barbara di Brandeburgo, nel convincimento che si trattasse dell'unico modo per far mettere in viaggio il suo consorte. E perché mai la Marchesana voleva che Ludovico andasse nel senese? Da fine politica qual era, circa un anno prima, approfittando del lungo soggiorno a Mantova del papa Pio II¹⁴ – che lì era giunto il 27 maggio del 1459 per tenervi la famosa Dieta alla quale sarebbero dovuti intervenire tutti i principi cristiani per indire e preparare una crociata per liberare Costantinopoli ormai definitivamente caduta sotto i Turchi (Foto 9) – aveva avviato con il pontefice una fitta trattativa perché concedesse il cappello cardinalizio al proprio secondogenito, Francesco (Foto 10)¹⁵. Barbara, infatti, ben sapeva quanto tale nomina fosse importante per una casata che da meno di trent'anni si poteva fregiare del titolo marchionale¹⁶ e che, pertanto, necessitava di alti riconoscimenti per poter essere definitivamente annoverata fra le principali d'Europa. Trattative che si protrassero a lungo e che la marchesa aveva affidato a Bartolomeo Bonatti, suo ambasciatore a Roma, ma che intendeva rendere più efficaci facendo incontrare il marito con il pontefice che sapeva in quei mesi risiedere fra Siena, i Bagni di Macereto e quelli di Petriolo per curarsi la gotta.

Quindi Ludovico non avrebbe avuto difficoltà a incontrarlo in un luogo e in una situazione certamente favorevoli, perché libero dagli umori della curia. E difatti, nel suo viaggio verso Petriolo, il marchese non si dimenticò di fermarsi a Macereto per trattenersi con il Piccolomini, con il quale non solo desinò, ma rimase per un lungo colloquio faccia a faccia e i cui contenuti non rivelò agli uomini al suo seguito. E altrettanto fece prima di lasciare i Bagni, trasferendosi appositamente al soggiorno del papa per un'intera giornata (il pontefice infatti, atteso a Petriolo, non vi si era potuto recare) con la scusa di licenziarsi da lui prima della sua partenza per ritornare a Mantova. Incontri senza alcun dubbio amichevoli e produttivi grazie alla capacità del Signore di Mantova di conquistarsi la piena fiducia di Pio II nei mesi che questi aveva trascorso presso la sua corte. Di questi colloqui e delle trattative sulla questione che più premeva alla marchesa e che anche in quei giorni videro impegnato Bartolomeo Bonatti¹⁷, Ludovico non dimenticò mai di dar conto alla consorte.

Appurate, dunque, le ragioni pubbliche e quelle sottese di quel soggiorno termale, mi limiterò qui brevemente a evidenziare alcuni degli aspetti più interessanti che emergono dalla corrispondenza che esso determinò, cercando di far rivivere al lettore l'atmosfera che si respirava in una corte ri-

14. Enea Silvio Piccolomini (Corsignano, 18 ottobre 1405 – Ancona, 14 agosto 1464) eletto papa il 14 agosto 1458. Il papa era in stretta relazione con i Gonzaga, avendo indetto a Mantova nell'ottobre del 1458 un concilio dei principi cristiani per intraprendere un'azione comune dell'intera cristianità contro i Turchi Ottomani che avevano definitivamente conquistato Costantinopoli e stavano prendendo possesso dell'intero impero bizantino, sotto la guida di Maometto II. Il papa entrò in solenne corteo a Mantova il 27 maggio del 1459 e, ospite di Ludovico, attese fino a settembre l'arrivo dei rappresentanti dei vari sovrani. Il 26 di quel mese chiese di intraprendere la nuova crociata e il concilio si concluse il 14 gennaio 1460 con l'emanazione della bolla *Vocavit nos* con la quale si bandiva ufficialmente la spedizione, che tuttavia rimase solo sulla carta. Nonostante l'insuccesso politico, il concilio fu per i Gonzaga un evento di fondamentale importanza che vedevano riconosciuto sullo scacchiere europeo il ruolo della loro città e del loro stato.

15. Francesco Gonzaga (Mantova 1444 – Porretta Terme 1483), secondogenito di Ludovico III, verrà poi creato cardinale da Pio II, col titolo di santa Maria Nuova, il 18 dicembre 1461.

16. Il primo marchese di Mantova fu Giovanfrancesco (? , 1 giugno 1395 – Mantova, 25 settembre 1444) che ricevette il diploma dall'imperatore Sigismondo il 6 maggio 1432.

17. Bartolomeo Bonatti era l'ambasciatore mantovano presso lo Stato Ecclesiastico. Sulle vicende e le trattative della nomina a cardinale di Francesco Gonzaga si veda I. Lazzarini, *La nomination d'un cardinal de famille entre l'Empire et la Papauté. Les pratiques de négociation de Bartolomeo Bonatti, orateur de Ludovico Gonzaga (Rome, 1460-1461)*, in *Paroles de négociateurs: l'entretien dans la pratique diplomatique de la fin du Moyen Âge à la fin du XIXe siècle*, a cura di S. Andretta – S. Péquignot – M. K. Schaub – J. C. Waquet – C. Windler, Roma, Ecole Française de Rome, 2009, pp. 51-69.

nascimentale e cercando di aiutarlo a scoprire la serenità che caratterizzava quegli uomini, frutto dell'eredità che a loro aveva lasciato uno dei più grandi maestri e pedagoghi che la storia ci abbia regalato. Le prime due lettere, l'una scritta dal primogenito di Ludovico, Federico, e l'altra dal cancelliere marchionale, Zaccaria Saggi, ci fanno rivivere le tappe del viaggio, l'atmosfera dei soggiorni nelle varie città dove i viaggiatori fecero tappa, soffermandosi sulle accoglienze ricevute e sugli incontri con signori, dignitari, alti prelati, artisti e gente comune. Si trattò di un viaggio piuttosto tranquillo, turbato soltanto da una giornata di furioso maltempo che accolse la carovana nella traversata dell'Appennino, un evento noioso ma tutto sommato propizio, giacché era stato predetto dall'astrologo.

«La notte si levoe grandissimo vento e non fu maraglia però che eravamo in su le spalle d'Appennino e la matina prima che si partissimo incominciò a piovere fortee con gran vento et era il tempo terribile, in modo che si ricordavamo de lo astrologho prefato»¹⁸.

Quello che però preme sopra ogni cosa agli autori delle lettere, è tranquillizzare Barbara sugli esiti positivi del viaggio, sottolineando di volta in volta l'accoglienza ricevuta dal marchese e dal suo seguito in ognuna delle città toccate e dall'atteggiamento di grande rispetto e amicizia dimostrato dai governanti di ognuna di esse nei confronti della casa regnante mantovana. La prima tappa fu a Mirandola «ove el Magnifico Conte Zohan Francesco»¹⁹ honoratamente e splendidamente ricolse

Sua Signoria in casa sua, facendogli tuto quello honore con buono effecto che a luy fue possibile». Qui il cancelliere porse i suoi omaggi alla «Magnifica Madonna Julia»²⁰ che immediatamente volle avere da lui nuove della marchesana, ciò che permise a Zaccaria di raccontare:

«che'l magiore desiderio che l'havea al mondo era di potere vedere una volta Vostra Signoria in quella casa, non perché quella ne fusse di meglio per esserli venuta che là non si sente sofficiente a poterla honorare secondo suoy meriti ma vorria per consolatione e gloria di se medesima. Credo che la dichì vero, però che a me pare che con affectione la parli e che la sia divotissima di Vostra Excellentia»²¹.

A Modena l'accoglienza fu altrettanto amichevole, seppure modesta, giacché l'assenza dalla città del suo signore, Borso d'Este²², che risiedeva a Ferrara, limitò le possibilità dei dignitari presenti.

«El sicondo giorno giungemo a Modena ove el prefato nostro Illustrissimo Signore allogioe in Castello secondo usanza, e tuti quelli ufficiali e principali che erano ne la terra uscirono incontro a Sua Excellentia secondo usanza. L'apparechio non venne d'altrove, si fece con quel meglio che si trovava essere ne la terra. E stettesi bene domesticamente e improvvisamente come accadde altre volte. Pur l'effetto fue buono»²³.

Altre lettere si soffermano su analoghi onori ricevuti al passaggio da Bologna e nei luoghi attraversati dal marchese e dal suo seguito lungo il viaggio

18. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 9 maggio 1460.

19. Si tratta di Giovan Francesco I Pico della Mirandola (? – 8 novembre 1467) padre del famoso umanista Giovanni Pico della Mirandola (1463-1494). Proprio nel 1460 fortificò il castello della Mirandola e corse in aiuto di Sigismondo Pandolfo Malatesta, signore di Rimini, attaccato dalle truppe di papa Pio II.

20. Giulia Boiardo, moglie di Giovan Francesco (Scandiano, ? – Mirandola, 1487).

21. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 9 maggio 1460.

22. Borso d'Este (1413 – 20 agosto 1471), marchese di Ferrara, nel 1452 aveva ottenuto dall'Imperatore Federico III il titolo di Duca di Modena e Reggio. La capitale dello stato era comunque restata a Ferrara, e di qui l'assenza del duca all'arrivo dei Gonzaga.

23. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 9 maggio 1460.

verso Firenze. Sull'accoglienza ricevuta nella città dei Medici è invece opportuno soffermarci, vista la grande impressione che destò sul signore mantovano e su tutti coloro che lo accompagnavano. Federico racconta alla madre del grande stupore che provocò in tutti l'entrata nella città.

«Aproscimando noi Fiorenza retrovassemo fuora dala porta uno populo grandissimo li venuto per vedere lo Illustrissimo et exellentissimo signore mio padre. E dentro la citade tanta moltitudine di zente era convenuta nela via unde passavamo che era uno stupore, et apena gie era via per li cavalli. Non dico de fenestre, pozi et altri luogi eminenti pieni de done, uomini de qualunque condicione, per modo che al grandissimo numero de zente indi, credo che tutta Fiorenza era riduta in quello transito che avevamo a fare. Fu dicto da Fioretini che quello populo mai non fu veduto cossi ben»²⁴.

Ma la descrizione di Zaccaria è ancor più precisa e riesce a farci rivivere quei momenti e a restituirci l'atmosfera che si respirava nella città toscana negli ultimi anni di vita di Cosimo il Vecchio.

«Incominciarono a venire incontro li principali de la terra e furono in gran numero e tuti come venivano smontavano a tohare la mano a Sua Signoria con grandissima riverentia et allegro viso e quanto più andavamo tanto magior numero retrovavamo, poy fuor de la porta trovammo un populo grandissimo a piede el quale tuto sera fato incontro per vedere Sua Signoria e così s'entrò drento con trombe e pifari de Signori e tuta la strada da l'uno lato e da l'altro fina lo alloggiamento che è a Santa Maria Novella era tuta piena del più bel popolo e del magiore che may vedessi così d'huomini come de donne bellissime agli ochi miei, le quale tute naturalmente mi piaciono che gliera un stuppore a vederle con tanti bei volti e così ben adorne che parevano veramente uscite de le mane di Andrea Mantegna che e così buon maestro; poy le mi parevano d'ogni natione a tanta varietà di aconciature di testa, quale pareva-



Foto 5. Rodolfo Gonzaga, particolare da Camera degli sposi: la corte.



Foto 6. Barbara di Brandeburgo, particolare da Camera degli sposi: la corte.

24. Lettera di Federico Gonzaga alla madre Barbara del 9 maggio 1460.



Foto 7. Alessandro Gonzaga, particolare da *Camera degli sposi: la corte*.

no angioi, quale francese, quale fiaminghe, quale inglese e quale inde, arabe e caldee. Che so io, noi, stavamo tuti come mantovani smemorati et usciti di noi stessi. E in tuto extratti d'ogni sentimento naturale. E soprattutto el nostro Illustrissimo Signore fue da ogni persona così maschio come femina de quali el numero era infinito, tanto gratiosamente e con allegro core veddutto che non è pena che explicare lo potesse, et è vero. Io resomiglio questa entrata in Fiorenza al paradiso veramente al quale chi vuol andare bisogna andare per faticose stradde, come sa meglio che me Vostra Illustrissima Signoria. Così trovammo noy stradde difficile, aspere e pericolose, mal tempi strani e fastidiosi. Poy trovammo veramente il paradiso, io dico el vivo e vero pieno di quelle visibile e palpabile forme e che parlano e rispondono, quando altri parla, e maravigliomi assai come chi vista non vive solamente di vedere o

25. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 9 maggio 1460.

26. Ivi, *passim*.

27. Divertente annotazione del cancelliere per indicare un discorso senza senso e l'adeguata risposta da parte del marchese. La fredda accoglienza dei senesi era dovuta alla precedente visita a Firenze, città con la quale la repubblica era da sempre in aperto conflitto.

dire e parlare senza essere subiecto ad alcun'altra passione naturale e non posso credere che chi ne facesse prova che non gli venisse ad affetto che si vivrebbe solo de la virtù visiva»²⁵.

Lo stupore dei mantovani per quell'accoglienza dovette crescere ancor più quando, il giorno successivo al loro arrivo in città, furono accolti con grande affetto da Cosimo nel suo palazzo e questi volle che il marchese ne visitasse le stanze e la cappella affrescata appena l'anno prima da Benozzo Gozzoli²⁶. E soffermandosi davanti alla parete sulla quale era dipinto *Il viaggio dei Magi: il corteo di Gaspare* si sarà reso conto che l'accoglienza ricevuta assomigliava molto a ciò che ora i suoi occhi vedevano in quella maestosa pittura (Foto 11).

Di tono ben diverso fu il modo in cui, lasciata Firenze e ripreso il viaggio verso i Bagni, fecero la loro entrata in Siena, dove i maggiorenti riceverono di malavoglia il marchese a palazzo, non riuscendo minimamente a dissimulare il loro risentimento nei suoi confronti per via della stretta amicizia che lo univa alla rivale signoria fiorentina. «Mercordì s'entroe in Siena a suono di tamborino senza trombe e senza suono» si rammarica Zaccaria, che aggiunge con una certa malizia: «Un solo cittadino sanese non mandato gli venne [incontro]». E infine conclude:

«Poy Sua Signoria andoe a visitare li Magnifici Signori senza che mandassero alchune per quella e così se gli fecero incontro fin a la scala secondo loro usanza e legge. Et entrati ne l'audientia si puosero a sedere e furono dette parole sanese e così risposto per le rime tanto che le parole furono corrispondenti a gli onori»²⁷.

Se non fosse stato per la presenza in città di molti cardinali e di gran parte della corte pontificia, è probabile che la freddezza sarebbe stata ancora

maggiore. E poi, il giorno successivo, quello che portò finalmente la comitiva a Petriolo, fu rallegrato dall'incontro con il papa a Macereto, che «gratiosamente e con buona ciera raccolse esso nostro Illustrissimo Signore» e, come ricorda Federico

«el Signore et Rodulfo e mi visitasemo Sua Sanctitate, et gie basasemo el piede e la mano. Li potei de Sua Sanctitate raccomandare Vostra Signoria, la quale me domandò come stasiva quella. Risposi ben a comando de Sua Sanctitate. Fata colazione li de marzapani, pignochate²⁸ habundantissimamente se partissimo e andasemo a disnare a Petriolo»²⁹.

C'è da chiedersi come si presentavano i bagni di Petriolo a chi vi veniva a trascorrere le cure termali in quegli anni. Nel corso del XV secolo quei bagni erano divenuti il più rinomato impianto termale della Toscana, citato nei principali trattati medici del tempo e, insieme al Bagno di Macereto, a quello delle Caldanelle e in misura minore a quelli di Altare e delle Potatine, formava un insieme di primaria importanza. Le prime descrizioni delle terme risalgono al Duecento, quando erano composte da quattro distinti bagni: quello degli uomini, quello delle donne, dal bagno detto *Grotta* e da un quarto stabilimento dove le acque raggiungevano una maggiore temperatura e che si trovava più in alto rispetto agli altri, un poco più discosto dal corso della Farma. Altre piscine vennero aggiunte, una già a metà del secolo XIII collocata fra quella degli uomini e quella delle donne chiamata «bagno della Ficarella» o della «Ficatella», e a questa seguì un «bagno del sangue» o almeno

uno spazio situato all'interno dello stabilimento riservato ai salassi. All'epoca in cui giunse il marchese con il suo seguito, erano stati da poco costruiti un «bagno del ferro», un «bagno dei cavalieri» e soprattutto uno stabilimento dove si aveva modo di fare la doccia. La maggior parte di queste strutture erano protette da muri e porticati e si trovavano lungo la Farma e, quando vi giunsero i mantovani, dovevano essere state appena rinnovate a seguito dell'inondazione del 1457 ricordata in una sua lettera alla Signoria dal medico Bartolo di Tura Bandini³⁰.

Una piccola idea di come dovessero essere disposte le vasche termali a quel tempo è possibile farsela osservando l'unico edificio rimasto. Disposto su due livelli, dei quali il più basso è costituito da un ampio portico, al cui interno sono disposte tre vasche di eguale dimensione, a pianta rettangolare e come incastonate nel pavimento, circondate da gradini che facilitavano l'ingresso in acqua. A sud, al di fuori del grande porticato, una terrazza affacciava sul fiume. Al piano superiore è invece collocata la chiesetta dei bagni (Foto 12).

Tutto intorno agli spazi termali sorgeva un ampio abitato che si consolidò nel corso del XIV e del XV secolo e che era formato, in epoca più antica, dai così detti «stazioneri» che, al tempo del soggiorno gonzaghese si erano già trasformati in veri e propri alberghi in numero non inferiore alla decina. Il piccolo borgo era stato fortificato nel 1409, cinque anni dopo la pace firmata fra Siena e Firenze e seguita alla rovinosa guerra fra ghibellini senesi e Orlando Malavolti a capo della fazione guelfa³¹. Già nel 1401 la Repubblica ave-

28. Palline dolci fritte di farina, uova, miele e zucchero. Oggi nota come *pignocata palermitana*, di antichissima origine greco-romana.

29. Lettera di Federico Gonzaga alla madre Barbara del 9 maggio 1460.

30. Cfr. L. Zdekauer, *Lettere di messer Bartolo di Tura sulla piena della Farma a Petriolo*, in *Bullettino senese di storia patria*, III (1894), pp. 754-757.

31. Orlando Malavolti (m. 1403), fu, insieme ai Tolomei, a capo della fazione guelfa senese. Nel 1390 i ghibellini, guidati dai Salimbeni e appoggiati da Gian Galeazzo Visconti, sconfissero drammaticamente la parte avversa e Orlando affidò alla Repubblica di Firenze la protezione della sua famiglia e del suo vasto stato signorile consistente nelle terre di Gavorrano, Montacuto, Pari, Ravi, Castel di Pietra e Tatti. Nella pace seguita nel 1404 fra Siena e Firenze, quest'ultima impose la restaurazione dei possessi e delle funzioni godute dai Malavolti in patria, ma Orlando, alla sua entrata in città, venne assassinato e i suoi possedimenti, a esclusione di Gavorrano, passarono agli avversari. Petriolo era stato distrutto durante le battaglie di fine secolo, trovandosi al confine fra i territori della Repubblica e i possedimenti di Pari.

va provveduto a fortificare la torre che serviva a difendere il ponte che attraversava la Farma, ma l'intervento fu giudicato insufficiente dopo i fatti del Malavolti. La cinta muraria, di cui restano alcune vestigia, fu completata intorno al 1412. In essa sorgevano quattro torri e tre porte: la «porta senese» che affacciava sulla via che conduceva a Siena e terminava a porta Stalloreggi, l'attuale Arco delle due Porte; la «porta del ponte» che si trovava al limite del ponte che tuttora attraversa la Farma e che dava accesso alla strada per Pari e per la Maremma (Foto 13); infine la «porta della Farma» che immetteva sulla strada che dai bagni, fin d'allora, s'inerpicava conducendo a Castiglione della Farma – luogo oggi conosciuto come Castellaccio e del quale rimangono alcuni ruderi, posto a valle del piccolo borgo di Solaia, nel territorio di Iesa – e di qui, passando per il castello di Lama, raggiungeva Monticiano. Ma l'intervento di fortificazione portò con sé un preciso programma di sviluppo urbanistico del sito, tanto che le autorità senesi nominarono una commissione di sei membri per mettere a punto l'intero progetto. La cinta muraria presentava forma trapezoidale, tre delle torri erano disposte su altrettanti angoli, mentre la quarta si trovava sul lato ovest delle mura, ed erano collocate a una distanza regolare l'una dall'altra. La Porta Senese era dotata di un portico ed era merlata, mentre tutte venivano chiuse con pesanti portoni di legno muniti di grosse ferramenta. Una fortificazione e una forma che ricorda da vicino quella delle tante ville nuove sorte sul finire del

Medio Evo e che generalmente si trovavano lungo le vie di comunicazione più importanti, luoghi di commercio e di riparo per i contadini che il giorno lavoravano nelle campagne. Esempio di tale tipo d'insediamenti rimane oggi, a poca distanza da Petriolo, il borgo antico di Paganico, conservato pressoché nella sua forma originaria³². Inizialmente il castello era difeso da alcuni pezzi di artiglieria, ma, dopo pochi anni, questa fortificazione servì solamente a proteggere i bagni da briganti e compagnie di soldataglie mal equipaggiate che vagavano fra alta Maremma e senese. L'interno del castello vedeva, accanto alle infrastrutture termali, gli alberghi e le dimore private costruite intorno a una piazza centrale sulla quale sorgeva il palazzo del podestà, che fu completamente ricostruito nel 1404 e ancora rinnovato in seguito³³, e a un altro edificio che ospitava i gabellieri³⁴. Poi, col passare degli anni la Signoria senese fu costretta a intervenire per limitare il moltiplicarsi delle costruzioni private che andavano a occupare spazi pubblici, come pure i lavori di ampliamento che interessavano gli alberghi³⁵. Infine vi si trovavano un ospedale dedicato a San Tommaso e una chiesa che aveva per patrono San Nicola.

Come ricordato, nel corso del Quattrocento, avevano preso a sorgere anche alcune dimore private, fatte costruire sia da signori, sia da ricchi mercanti. In tale contesto, nel 1447, Elisabetta vedova di Giovanni da Varano, signore di Camerino, sollecitò a Siena l'autorizzazione per edificare una villa ai bagni, dicendo che era alla ricerca di

32. Paganico presenta la struttura tipica del borgo franco fortificato, in grado di adempiere a funzioni doganali e di libero scambio commerciale. Attrezzato per la difesa della bassa Valle dell'Ombrone, fin dal 1273 fu sede di un mercato settimanale. L'impianto urbanistico, articolato su due principali assi viari, tra loro perpendicolari, e contraddistinto da strade dritte, caratterizzano il centro come *villa nova*, appositamente costruita in base ad una precisa pianificazione.

33. ASS, *Statuti* 38, c. 15; *Concistoro* 232, c. 17. Nel gennaio del 1447, i priori deliberarono lavori di restauro del palazzo (cfr. ASS, *Concistoro* 486, c. 7v; *Gabella dei contratti* 647, c. 8).

34. Nel 1447 i gabellieri occupavano la parte retrostante del palazzo del podestà, ma nel 1475 fu costruito un edificio specifico riservato alla gabella (cfr. ASS, *Concistoro* 486, c. 7v; *Consiglio generale* 236, c. 139v).

35. Il 17 ottobre 1447, «Iacomo d'Ambruogio Spannochì fa fare certo edificio allato al palazo del Comune nostro et habitatione, nel quale edificio occupa una grande parte de la piazza d'esso nostro comune» (cfr. ASS, *Biccherna* 760, c. 13v). Il 12 gennaio 1449, si dovette intervenire contro Mariano di Paolo Minucci de Bargagli che fece edificare un nuovo edificio «in Castro balneorum de Petriuolo», che occupava parte della «stratam et viam comunis» (cfr. ASS, *Concistoro* 498, c. 10).

uno spazio piacevole e comodo che gli alberghi non le potevano offrire. E la Signoria le concesse l'autorizzazione di ingrandire la sua abitazione, che sorgeva nei pressi del «bagno del ferro» e che da un lato confinava con la strada e la casa di tal Niccolò Piccinini, da un altro con il ponte della Farma e da un altro ancora con la Farma stessa, permettendole anche di edificare due terrazamenti di cui uno con affaccio sul fiume³⁶. Con tali interventi, a poco a poco, la clientela aristocratica dei bagni cercò di sottrarsi al fastidio della promiscuità con gli ospiti comuni e i bagni si trasformarono da una semplice stazione termale in luogo di vera e propria villeggiatura.

Villeggiature e cure che trascorrevano in piena allegria, stando a quanto scrisse nel maggio del 1455 Piero di Cosimo de' Medici a suo padre, nell'informarlo che il piccolo «Lorenzo – il futuro Magnifico – fu fatto signore del bagno», mentre tutta la brigata se la spassava di gran buon umore.

«Qui non s'attende se non a ballare, chantare e sonare – continua Piero –. Se la Bianca e la Nannina ci fussano state, non poteva manchare che una di lor non fusse stata la madrina del bagno delle donne, e Dio il sa quante belle grillande arebono haute et quante torte di marzapane arebono mangiate, perocché Lorenzo, che è il Signore, n'è sempre mai a sciolvere et a desinare et a merenda»³⁷.

Le nostre lettere non raccontano di balli, ma di marzapani sì.



Foto 8. Bartolomeo Manfredi, particolare da *Camera degli sposi*, la corte.

Fra i dieci alberghi il marchese, con ogni probabilità, scelse di soggiornare in quello di Giovanni di Golfò. Lo deduciamo da parecchie lettere che anni più tardi la figlia ventitreenne di costui, Barbara, indirizzò a Federico, ormai succeduto a Ludovico nel principato mantovano, annunciando al signore di essere in procinto di maritarsi con Pietro Paolo Scheggi, «uno popolano Sanese, assai de buona famiglia, et discreto, ma povero de substania», e nelle quali chiedeva che le venisse accordato un sussidio dotale. A motivo della ri-

36. Il 28 dicembre 1447 «*Domini Quatuor prefati attento quod magnifica domina donna Elisabeth relicta domini Iohannis domini de Camerino amica et benivola comunitati Senarum, habet in Castro balnei de Petriuolo quoddam casamentum in loco detto in sul bagno del ferro, cui ex uno domus olim Nicolai Piccinini mediante via et ex alio flumen Farme, ex alio pons Farme (...), quod casamentum est adeo parvum quod ipsa domina veniens ad balnea non haberet comodum suum; et intellecto quod ipsa magnifica domina intendit dictum casamentum sivedomum crescere et ampliare ut comodi ut possit eo uti et ipsum habitare, intelligentes quod proptere levationem et amplificationem dicte domus nemin ifit preiudicium sive damnum, ymmo ex ea sequitur honor Comunis Senarum, comodum dicte magnifice domine et benignitas ac integratio amoris inter Magnificum Comune Senarum et ipsam magnificam dominam, unanimiter et concorditer deliberaverunt concedere et concesserunt licentia me idem magnifice domine attendi et extollendi dictam domum sive casamentum sex brachiis et faciendi unum palcum ubi nunc est tectum et in dicto palco faciendi ballatorium versus Farmam exportatum extra murum tribus brachiis et similiter faciendi ballatorium ex parte anteriori latitudinis trium brachiorum et hoc omni meliori modo etc.*» (cfr. ASS, *Biccherna* 760, c. 20 v.).

37. La lettera di Piero di Cosimo, datata 1 maggio 1455, è conservata presso l'Archivio di Stato di Firenze, *Mediceo prima del Principato*, XII, 216 ed è stata resa nota da G. Pieraccini, *La stirpe de' Medici di Cafaggiolo. Saggio di ricerche sulla trasmissione ereditaria dei caratteri biologici*, Firenze, Vallecchi, 1924, vol. 1, p. 82.



Foto 9. Pio II convoca il Concilio di Mantova, Pinturicchio, Siena, Cattedrale, Libreria Piccolomini, 1502-1507.

38. La notizia di tale corrispondenza in A. Portioli, *I Gonzaga ai bagni di Petriolo...cit.*, p. VI.

39. Bartolo Bandini, detto Bartolo di Tura (Massa Marittima, 1391 – Siena, 1477), si laureò in arti e medicina nello Studio Senese dove insegnò prima filosofia naturale e poi fisica, sebbene con delle interruzioni perché chiamato a ricoprire pubblici uffici sul territorio della Repubblica senese. Divenne medico dell'ospedale di Santa Maria della Scala dal 1444 e nel novembre di quell'anno fu inviato a Piombino per curare Paola Colonna, nonché nel 1449 a Castellotieri per la cura di Bosio Attendolo, fratello di Francesco Sforza e marito della contessa Cecilia di Santa Fiora, ma tornò ben presto a Piombino per la malattia di Rinaldo Orsini. Queste missioni sanitarie erano accompagnate da segrete istruzioni politiche poiché doveva raccogliere notizie sullo Stato di Piombino e far in modo che Caterina Appiano, morendo il marito, restasse fedele ai senesi. Fu anche ambasciatore di Siena a Venezia. Nel 1450 tornò a Piombino con l'incarico di sorvegliare Caterina Appiano affinché, dopo la morte del marito, non tornasse all'alleanza con Firenze. Nel novembre di quell'anno, giacché gli Appiano avevano raggiunto l'accordo con Firenze, cercò di suscitare una ribellione di cui non ci è noto l'esito. Ebbe molti altri incarichi e accompagnò Pio II a Mantova in occasione della dieta lì tenuta nell'intento di lanciare la crociata contro i Turchi. Di lui sono note lettere indirizzate a Lorenzo il Magnifico e alla Signoria di Siena nelle quali illustra le proprietà terapeutiche dei bagni di Petriolo. Sono noti anche due suoi *consilia*, l'uno dato a Pio II di grande importanza per avere notizie sulle conoscenze mediche del tempo e che contiene la descrizione della sintomatologia, delle cause e la diagnosi della malattia del pontefice (gotta viscerale e articolare, calcolosi renale, insufficienza epatica, catarro bronchiale) e al quale consiglia uno speciale tenore di vita (cure purgative a primavera e in autunno, permanenza in ambienti temperati con fuoco di legna di ginepro, evitare l'aria torbida e grossa) e poi un'apposita dieta (eccitanti prima dei pasti, pane di frumento e di spelta, poco salato e poco fermentato, brodi con erbe odorose e con semolini di miglio e di grano, succo di melagrana in luogo del vino, uso delle carni limitato a quelle di coniglio, vitello, daino, starnie e pernici, abolizione della frutta fresca). Infine considera come rimedio sovrano le cure idrotermali di Macereto, di Petriolo e della Caldanelle fatte in luoghi coperti di ramoscelli resinosi e di lini, bagnati con essenze, in cui si facciano suffumigi di ginepro e mirto. L'altro *consilium* fu scritto per San Bernardino e si limita alla diagnosi della malattia (entrambi si ritrovano presso

chiesta, la giovane donna ricordava al marchese come, durante il soggiorno suo e di suo padre del 1460 a Petriolo, egli l'avesse tenuta a battesimo e che lei portava quel nome in omaggio a Barbara di Brandeburgo³⁸. Per Giovanni del Golfo l'occasione di ospitare il signore di Mantova e il suo seguito significò mettersi per sempre alle spalle il ricordo della rovinosissima e tragica inondazione della Farma alla quale già abbiamo accennato e che si era verificata meno di tre anni prima, nella notte fra il 21 e il 22 settembre del 1457 e in seguito alla quale il suo albergo fu invaso dalle acque e gravemente danneggiato. Conosciamo diversi particolari di quanto accadde quella notte, grazie alla dettagliata lettera di Bartolo di Tura Bandini, uno dei più eminenti medici e naturalisti del tempo³⁹, indirizzata alla Signoria senese e che mi par utile riproporre perché, attraverso di essa, si potrà ancor meglio immaginare come fosse disposto l'antico castello dei bagni di Petriolo.

«Magnifici domini officiales et patres prestantissimi. Post recommendationes et cetera.

Parmi essere mio debito, trovandomi qui, d'avvisare le vostre Magnificentie del grande diluvio è stato qua, dunde non piccolo danno risulta a la Vostra Magnifica Comunità; e a quello stimo giudicharete doversi provvedere. Fu sì gran piova giovedì nocte, seguendo il venardi, et sì grande la piena de la Farma che l'acqua entrò a le finestre del mulino, et bisognò che 'l mugnaio cola sua famegliuola fugisse in sul tecto et con fadigha canparò. Entrò l'acqua a la porta de la Farma, la quale levò via et allagò il piano degli alberghi tiene lo Scarsella, verso la Farma, nel quale alço più d'uno braccio. Entrò alla porticciuola de' bagni et alçosi sopra l'acqua de' bagni sei braccia, sì che le more de' docci andàro tutte sotto fino a' ferri catene d'esse more. Et ghonfiò tanto l'acqua sopra ai bagni che pense il muro del Comune, di nuovo merlato, et la metà gittò per terra fino a' fondamenti del fiume, donde la metia de le casette di Giovanni di Guccio andò via nel fiume col tecto et fondamento. Il resto del muro castellano è fesso et conquassato, et il bagno de' cavalieri et l'altro a quello vicino, è scassato, né possano tenere aqua. La volta sopra al bagno del ferro è aperta; casse et masseritie che erano sopra a quella perdute et ite via. Il bagno de le donne allaghò et alçovisi l'acqua due braccia, la quale venne per li conducti del bagno delli uomini, entrò per più finestre de le casette di Anbrugio Spanochi, et uno cavallo affogò. Altro danno a persone per dio gratia non fè, ma ben si crede che il ponte habbia ricevuto grande manchamento da fondamenti per anco non si può vedere. Ricordo adunque a le Vostre Magnificentie voliate operare che questi bagni si possino usare, atese le loro singolari virtù, le quali, per fugire otio, ò in questo luogho examine et notate in questi versetti per utile et honore della città vostra et dare doctrina a

chi non lo sapesse. L'altissimo conservi et acresca le magnificentie vostre, a le quali ora et sempre mi raccomando.

Datum ex Balneis Petrioli die XXIII Setembris 1457.

Bartholus, atrium et medicine doctor, et cetera»⁴⁰.

Il medico chiese, dunque, l'intervento immediato della Signoria, motivando questa sua richiesta con «le singolari virtù» terapeutiche dei bagni, e la Signoria accettò prontamente l'invito se, all'arrivo dei Gonzaga, la vita e le attività dell'impianto termale erano ormai pienamente riprese. I danni riportati dall'albergo di Giovanni di Guccio furono tali da farci immaginare che nel 1460 quell'impianto fosse stato completamente rinnovato e, pertanto, in grado di ospitare degnamente clienti di tale prestigio. Tuttavia il marchese avrebbe voluto per sé uno spazio ancor più comodo, un luogo che gli desse modo di leggere e studiare in assoluta tranquillità. Per questo aveva un proprio progetto, che poi mise da parte per la difficoltà della sua realizzazione.

«El disegno de la camera e saletta che voleria fare Sua Signoria qui a bagni è rimasto perché non basta el tempo e anchora male si trovano qui le cose necessarie a tal bisogni»⁴¹.

In ogni caso l'albergo che aveva scelto per il suo soggiorno non doveva essere secondo a quello di proprietà di Cristoforo di Giovanni che disponeva di più di trenta letti e di una dozzina di stanze attrezzate per ricevere gli ospiti e dotate di lettiera, tavolo e cassapanca per porvi gli abiti⁴². Per il tempo si trattava di un esercizio decisamente imponente, assai più grande di quelli che ospitavano

la Biblioteca Apostolica Vaticana, *Codice Vaticano Latino 1440*). La lettera qui pubblicata riguardante l'inondazione della Farma è stata resa nota da L. Zdekauer, *Lettere di messer Bartolo di Tura sulla piena della Farma a Petriolo*, in *Bullettino senese di storia patria*, III (1894), pp. 254-257. Lo stesso fu autore del saggio *Un consulto medico dato a Pio II*, *ibid.*, V (1898), pp. 101-106. Sui bagni di Petriolo si segnala anche G. Veronesi-Pesciolini, *I bagni senesi di Petriolo*, in *La Diana*, VI (1931), pp. 110-135.

40. Cfr. L. Zdekauer, *Lettere di messer Bartolo di Tura... cit.*, pp. 256-7.

41. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 14 maggio 1460.

42. M. Tulliani, *Osti, aventori e malandrini. Alberghi, locande e taverne a Siena e nel suo contado tra Trecento e Quattrocento*, Siena, 1992, pp. 202-207.

i viaggiatori in transito nelle città dove, stando ai documenti pervenuti e che riguardano realtà non solo italiane, era difficile trovare alberghi che raggiungevano la ventina di posti letto⁴³. E anche quello di Jacopo d'Ambrogio Spannochì, edificato nel non lontano 1447⁴⁴, dovette probabilmente essere restaurato a seguito dell'alluvione.

Il marchese e il suo sontuoso seguito quando giunsero a Petriolo verso l'ora di pranzo del 9 maggio 1460 approdarono, dunque, in un luogo ampiamente rinnovato e accogliente, forse mutato rispetto a quello che li aveva visti pochi anni prima. Ad accogliere il marchese Ludovico e i suoi furono due cardinali, «Monsignor de Bologna e Sancti Quattro», ossia Filippo Calandra, vescovo di Bologna⁴⁵ e Luis Juan de Milà⁴⁶, quest'ultimo nipote del defunto Callisto III, il predecessore di Pio II, nonché cugino dell'allora Vice Cancelliere Rodrigo Borgia, il futuro Alessandro VI, padre del conte Valentino e di Lucrezia, che il signore di Mantova aveva poche ore prima incontrato nella giornata trascorsa a Siena⁴⁷. E, dopo pranzo, Ludovico e i suoi figli ricambiarono la cortesia andando a porgere i loro omaggi ai due porporati negli alloggi che questi occupavano. Due per-

sonaggi che non dovevano disdegnare né le belle donne, né i piaceri e che l'attento Zaccaria Saggi colse in un momento di «ricreazione» che non volle tacere alla sua Signora.

«... scrivendo questa ho visto fuor per la finestra in sul monte qui vicino li Reverendissimi Monsignori di Bologna e Santi Quatro giochare a le bracie in presentia di quattro donne. Le quale cantavano tuta via, e così insieme se ne sonno retturnati a casa di compagnia. Bisogna pur pigliarsi qualche ricreazione in questi luochi rinrescevoli che ci sa d'altro che di gibetto⁴⁸ e benzini⁴⁹».

Così iniziò quel soggiorno alle terme, durante il quale il marchese e i suoi figli alternarono i bagni alle docce. Ludovico, nei momenti di riposo, si dedicava alle letture di poeti latini e di autori del suo tempo e chiedeva alla moglie di mandargli altri libri che aveva dimenticato, o che pensava di avere con sé, ma non trovava nelle casse. Di tanto in tanto poneva anche mano alla correzione delle bozze delle opere di Virgilio che aveva voluto e finanziato e la cui edizione aveva affidato a Bartolomeo da Piadena⁵⁰.

43. Ibidem, *passim*.

44. Il 17 ottobre 1447, «Iacomo d'Ambruogio Spannochì fa fare certo edificio allato al palazzo del Comune nostro, et nova habitatione», cfr. ASS, *Biccherna 760*, c. 13v).

45. Filippo Calandra (Sarzana 1403 – Bagnoregio, 18 luglio 1456). Arcivescovo di Bologna, creato cardinale da Nicolò V il 20 dicembre 1448 col titolo dei Santi Giovanni e Paolo.

46. Luis Juan de Milà (Játiva, 1430-32 – Bélgida, 1508-10), cugino di Rodrigo Borgia e quindi anche di Callisto III che lo creò cardinale il 17 settembre 1456.

47. Rodrigo Borgia, futuro Alessandro VI (Xativa, 1 gennaio 1431 – Roma, 18 agosto 1503), verrà eletto al soglio pontificio l'11 agosto 1492. Fu elevato al cardinalato dallo zio Alonso Borgia divenuto papa col nome di Callisto III nel febbraio del 1456 all'età di 25 anni e da questi nominato vicecancelliere il primo settembre 1457, carica che gli conferì un potere smisurato. Nonostante proprio nel 1460 l'allora pontefice Pio II lo avesse severamente ripreso per i suoi costumi libertini e poco consoni al suo stato, il Borgia riuscì comunque a conquistarsi la fiducia del Piccolomini facendo allestire a sue spese una galea per la crociata contro i turchi, tanto agognata dal pontefice, che accompagnò anche nel suo ultimo viaggio ad Ancona, dove Pio II morì il 14 agosto 1464. Per immedesimarsi nella corte di Alessandro VI e in quelle italiane del tempo, resta sempre isostituibile la lettura di M. Bellonci, *Lucrezia Borgia*, Milano, Mondadori, 1939.

48. Forca.

49. Mazze.

50. Bartolomeo Sacchi detto il Platina (Piadena, 1421 – Roma, 1481), umanista e gastronomo. Il soprannome gli deriva dal nome latino di Piadena. Fu dapprima al servizio di Francesco Sforza e Niccolò Piccinino, ma si trasferì poi a Mantova per avviarsi agli studi umanistici. Qui fu discepolo di Ognibene da Lonigo che aveva assunto la guida della *Casa Gioiosa* dopo Iacopo da Cassiano, a sua volta succeduto a Vittorino da Feltre. Fu precettore dei figli di Ludovico III Gonzaga e al marchese dedicò un'operetta dal titolo *Bartholomei Platinensis Divi Ludovici marchionis Mantuae somnium* sotto

A informare la Marchesana con più dettagliati particolari sui modi e sul progresso delle cure termali, sullo stato di salute di Ludovico, Federico e Rodolfo, non si preoccuparono solo il marchese e il suo segretario, ma soprattutto i medici al loro seguito che la tennero al corrente su ogni risultato, sull'alternanza fra bagni e docce, sui loro effetti, sulla pratica dei salassi nell'apposito bagno e delle inalazioni e sui risultati delle cure. Mentre il solito Zaccaria si premurava di rassicurare Barbara sullo stato di salute dei suoi cari, informandola

«ch'el nostro Sua Signoria sta de la persona in modo che non mi ricordo gran tempo vedere Sua Signoria star meglio e così dio per contentezza di Vostra Signoria e di tutti i suoi servitori c'el conservi e riduchi a la propria casa. Sua Signoria piglia la doccia due volte lo dì di temperatamente e bagnasi una volta la matina con la persona. Similmente pigliano la doccia li Illustri messer Federico e Roldolfo et esso messer Federico si bagna le gambe solamente nel bagnio et ambi stanno de le persone benissimo»⁵¹

In particolare la doccia era la cura ritenuta più efficace, tanto che, come ricorderà in una sua lettera Alessandro, si arrivava a versare sul paziente fino a sessantacinque barili di acqua ogni ora⁵², ossia circa 3000 litri ogni ora. Ma, insieme alle cure e alle letture, il marchese non si sottrasse anche ad altri passatempi, perché «in questo bagno bisogna havere uno forte diversivo a farse domenticare la grande puza ge è»⁵³. Qualcuno arriva a dire che a causa di quel «fetore sulfureo» ha creduto «più volte essere in lo inferno»⁵⁴. Per cui il marchese non disdegnò le cavalcate che lo allontanavano da

forma di dialogo in lode delle cure che il marchese prestò nella trascrizione delle opere di Virgilio. È evidentemente alle bozze di questa edizione che si riferisce Ludovico III nella lettera indirizzata alla moglie del 12 maggio 1460.

51. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 14 maggio 1460.

52. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 17 maggio 1461.

53. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 6 maggio 1461.

54. Ivi, *passim*.

55. Lettera di Giovanni Suardi alla marchesana Barbara del 22 maggio 1460.



Foto 10. Il cardinale Francesco Gonzaga, particolare da *Camera degli Sposi: l'incontro*.

quel luogo pestifero e lo portavano a scoprire e visitare i dintorni. Del resto Ludovico era un buon cavaliere e non aveva timore di avventurarsi per bricchi e pareti scoscese per giungere a belvedere dai quali si poteva, forse, intravedere il mare.

«Lo Illustrissimo Signore nostro sta bene e continua la dozza e li bagni. Hora doppo desnare montò a cavallo e cavalcò e mi con la sua Signoria per questi brichi e cespi che non è capra a cui non renresesse d'andarvi né tenemo via né sentero pur zunsemo a casa cum la gratia di Dio e andassimo ala summità de uno monte per mostrare lo mare ad chi non lo havea visto. Chi dice che ghe quello et chi no, credere o non credere questo non è articulo de fedes»⁵⁵.



Foto 11. Il viaggio dei Magi: il corteo di Gaspare, Benozzo Gozzoli, Firenze, Cappella dei Magi, Palazzo Medici-Riccardi, ca. 1459.

Né mancò il tempo per presenziare, come detto, al battesimo della neonata figlia dell'albergatore, e neppure quello per intrattenersi con i tanti cardinali che in quei giorni, forse per non perdere del tutto di vista Sua Santità, soggiornavano anche loro ai bagni e che, giungendo a Petriolo, non scordavano di mandare qualche presente al marchese⁵⁶. E l'andare e venire di tali personaggi era l'occasione giusta per raccogliere nuove sugli avvenimenti politici e militari che riguardavano il Regno di Napoli. E il marchese non disdegnò neppure di fare acquisti di oggetti preziosi, così che Zaccaria volle annunciare alla sua padrona che

«Sua Excellentia porta un colaro d'oro comproda uno Spagniuolo bello assai secondo gli altri che si usano per quelle natione e ha oppinione farne una grande invidia a Vostra Signoria»⁵⁷.

Poi, con grande sollievo di tutti, il 29 maggio il numeroso corteggio prese la via del ritorno.

Venti giorni di bagni, se avevano giovato alle difficoltà di respirazione del piccolo Rodolfo – «sta molto bene e per quello ne deve recevere grande zovamento de questi bagni lo naso se glie aperto, che dicono non soleva mai sopiarlo ch'el ne cavasse alcuna cosa e hora se ne vene zoso senza fatica e spesso, alo mio giuditio ello voria uno forte e grande exercitio», scrive il suo medico – erano stati forse troppi per il giovane Federico che

«da zobia in qua no se è bagnato ne tolta dozza, perché pur se rescaldò alquanto et haveva alquanto di febre che segno terzana non stete però de andare non è parso di tore li bagni, per quello starrà così i ozi e domane ch'ello è stato bene questo di poi ritornarà credo che lo havere bevuto l'acqua da le caldanelle ghe turbasse lo stomaco che gli à fatto questo impazzo»⁵⁸.

Zaccaria Saggi sembra decisamente contento della prossima partenza, perché

56. Ivi, *passim*.

57. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 22 maggio 1460.

58. Lettera di Rolando Suardi alla Marchesana Barbara del 29 maggio 1460.

«quasi tuti habiamo principio d'haver male e duolci el capo universalmente a tuti che tuto procede da questo putrido e pestifero aere che è qui e dal rincrescimento continuo che se ha in questa stantia»⁵⁹.

Del resto, le trattative per la nomina a cardinale di Francesco avevano raggiunto lo scopo desiderato, come Ludovico si affrettò a comunicare alla moglie il 26 maggio.

«A la parte del prothonotario da Padova⁶⁰, el ne pare de aspetare che siamo a cosa che possiamo essere insieme e consultare questa cosa perche s'el avesse ad esser fatto Cardinale et de primi che se farà nui el toressimo per avere el papa e tutti li Cardinali per Conpadri»⁶¹

Che motivo avrebbero avuto per trattenersi ulteriormente in quel luogo così «putrido e pestifero»?

...

Nel 1461 alla volta di Petriolo si diresse Alessandro Gonzaga, fratello minore del marchese, che lì intendeva trascorrere i soliti venti giorni di cure. Si trattò di un soggiorno quasi solitario, nello spirito di quell'uomo che, da quando era restato vedovo alcuni anni prima, si era un poco ritirato dalla vita pubblica entrando in convento – nel suo viaggio a Petriolo si era fatto accompagnare da pochi cortigiani e dal medico di corte –. Un soggiorno che, a leggere le sue lettere, cercò di rendere piacevole. Comunque Alessandro era un grande viaggiatore e, quando venne a Petriolo, era da poco rientrato da un lungo pellegrinaggio in Terra Santa.

A leggere le sue lettere si ha però la sensazione che le recenti scelte di vita non avessero smorza-

to in lui l'interesse per i fatti del mondo, né ne avessero intaccato il carattere allegro e leggero. Da una parte sono, infatti, ricchissime di notizie riguardanti gli eventi salienti del momento: quelli che riguardavano le lotte fra Ferdinando d'Aragona e i baroni napoletani affiancati da scaltri e feroci mercenari; gli scontri che dividevano a Roma i Colonna e gli Orsini; le scorribande di banditi nell'agro romano; le lotte interne che dividevano l'arcivescovo di Genova, da una parte, e il Doge della Repubblica ligure, dall'altra. Sembra quasi che Alessandro abbia approfittato di quel viaggio per incontrare ambasciatori e agenti segreti allo scopo di raccogliere nuove fresche da inviare alla corte di Mantova e i suoi scritti mettono in luce le sue non comuni capacità diplomatiche mescolate a una sana curiosità che gli permisero di raccogliere le confidenze di molti, compresi alcuni fra i più potenti Signori del tempo.

Una volta a Petriolo non smette di indagare e di raccogliere notizie, tuttavia sembra più interessato a informare la cognata di qualche pettegolezzo, soprattutto riguardante Battistina Fregoso, la giovane e bella moglie di Jacopo Appiani, signore di Piombino, che il Gonzaga incontrò alle terme al suo arrivo, facendo intendere di essere piuttosto soddisfatto che non fosse accompagnata dal marito che, tuttavia, con suo grande disappunto, la raggiunse qualche giorno più tardi. Ma non perse di vista la nobile coppia, anzi.

«Una cosa haveva lassata a dire del prefato Signor de Piombino ciò è del singulare amore mostra portare a madona sua moglie in modo che quasi mai non se destacha da essa. Se lo faza per zelosia non so, mancho l'ho inteso incredolo, anzi piutosto me voglio atachare ala bona parte. Vanno a solazo ambi duj insieme. Quando la va a tuore la doza la mazor parte va sego e sta a vedergela tuore. Nonche lui toglia però né mostra havere biso-

59. Lettera di Zaccaria dei Saggi alla marchesana Barbara del 22 maggio 1460.

60. Si riferisce sempre a Francesco, che aveva avuto la nomina a protonotario apostolico durante il suo soggiorno a Padova dove svolse i suoi studi prima di trasferirsi a Pisa per addottorarsi.

61. Lettera del marchese Ludovico alla moglie Barbara del 26 maggio 1460.

gno de bagni. Lei etiam fa grande demonstrazione portare grande amore al suo signore»⁶².

Gli era comunque restata una piccola consolazione.

«Havemo ancho uno altro piacere che quando me imbato a tuore la doza ch'el ge ancho quella sopradicta madona come spesso intravene e cossì una sua parente maritata secondo intendo in li Spinoli⁶³ et è sorella del novo duce de Zenova⁶⁴ de la quale me haveva domenticato per l'altra mia scrivere ala Vostra Signoria e togliano ambedue la doza insiem»⁶⁵.

Anche se si era chiuso in convento, non disdegnava né il bel mondo e neppure la compagnia delle belle donne, come dimostra l'accenno a un piacevole accadimento che gli occorse a Siena, sulla via del ritorno, dove sostò per un giorno e fu

«invitato ad una bella festa in la quale se ritrovavano di gallante damiselle. De le maniere habiti e portature loro me reservo a dirlo a bocha a la Vostra Illustrissima Signoria se lo cervello me bastarà»⁶⁶.

In quelle missive Alessandro mette in risalto anche un altro aspetto della sua personalità. È infatti uomo dal notevole senso dell'ironia e ancor più dell'autoironia e, inoltre, sa esprimere a pieno il sincero e profondo rapporto di affettuosa amici-

zia e stima convinta che nutre per Barbara e che si spinge fino a una sorta di allegra complicità. Le sue lunghe lettere – della sua presunta prolissità, che in realtà non è tale, visto che va sempre al cuore degli argomenti che tratta, si scusa, dichiarando di esser consapevole della assoluta incapacità di sintesi – ce lo mostrano uomo assai colto, dotato di una spiccata leggerezza interiore, capace di osservare e ascoltare, qualità tutte che gli doveva aver trasmesso il suo maestro Vittorino da Feltre che, non a caso, lo annoverava fra i suoi prediletti. Lettere di grande significato anche per vivere lo spirito dei viaggiatori del tempo, almeno di quelli come lui che appartenevano a una famiglia di governanti e che si erano formati in pieno Rinascimento, che vistando i luoghi sapevano coglierne gli umori, i problemi, le urgenze, e bene sapevano comunicare tutto ciò ai propri interlocutori senza cadere nel chiacchiericcio e nella malignità. E anche le annotazioni sul procedere delle sue cure termali, sul modo in cui queste venivano somministrate, sulle varie pratiche cui si sottoponeva, sui risultati positivi e negativi delle stesse, risultano ricche di spunti interessanti.

Come suo fratello l'anno prima, anche Alessandro, prima arrivare a Petriolo, si era fermato a Firenze e a Siena, dove ebbe modo d'incontrare Giovanni di Cosimo de' Medici che se ne ritornava verso casa «cum la dona sua» e «cum circa cavalli 25»⁶⁷, proveniente anch'egli da quei bagni. Una volta giunto a Petriolo cominciò

62. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 17 maggio 1461.

63. Gli Spinoli erano una delle altre famiglie più potenti della Repubblica di Genova e annoverarono fra di loro diversi dogi.

64. Prospero Adorno (Genova, 1428 – Asti 1485) eletto doge il 9 marzo 1461, rimase in carica fino al 17 luglio dello stesso anno. Durante il suo dogato si scontrò con l'arcivescovo Fregoso, desideroso di ottenere il titolo cardinalizio rifiutogli da Pio II di cui l'Adorno era amico. Tuttavia l'arrivo a Genova di Renato d'Angiò costrinse i due a una rapida quanto inaspettata alleanza che fu decisiva nella battaglia di Sampierdarena che seguì il 17 luglio di quello stesso anno. Ma il subitaneo rinascere delle divergenze e l'intervento della flotta di Bartolomeo Doria in favore dell'arcivescovo, costrinsero Prospero a lasciare il potere dogale e a fuggire da Genova.

65. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 17 maggio 1461.

66. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 5 giugno 1461.

67. Giovanni di Cosimo de' Medici (Firenze, 3 luglio 1421 – Firenze, 23 settembre 1463), figlio minore di Cosimo il Vecchio e di Contessina de' Bardi, uomo di cultura e mecenate. Per lui, oltre a Mino da Fiesole e Desiderio da Settignano, lavorarono Donatello, Domenico Veneziano, Filippo Lippi e il Pesellino. Collezionò arazzi e dipinti fiamminghi importati a Firenze attraverso la succursale del banco de' Medici di Anversa e strumenti musicali. Fu mecenate di musicisti e letterati. Aveva sposato nel 1453 Ginevra degli Alessandri e da lei ebbe un solo figlio, Cosimino, che gli premorì nel 1459.



Foto 12. Bagni di Petriolo, la cappella con le sottostanti vasche.



Foto 13. Bagni di Petriolo, il ponte sul fiume Farna.

«... a tuore el bagno et ho lo tolto tre matine per consiglio de li medici inanti habia comenzato a tuore la doza standoge dentro meza hora vel circa per volta. Questa sera ho comenzato a tuore la doza per meza hora et dei gratia in questo principio e bagno e doza porto molto bene e spero domino concedente perseverarò de bene in meglio benché lo bagno credo torrò rare volte perché principaliter lo facto mio secondo el parere del medico sta in la doza»⁶⁸.

Il Gonzaga soffriva di rachitismo⁶⁹, e forse fu anche per questo che le cure gli crearono non pochi problemi.

«Dopo scissi ala Signoria Vostra non sono più intrato in bagno alcuno cum la persona havendo pur solamente atteso ala doza come rechiede el bisogno mio, pur penso intrarò etiam qualche volte in lo bagno. Giovamento anchora alcuno no me sento, che no me pare poca meraviglia. Credo che fina alquanti mesi sentirò el fruto ne haverò cavato che dio voglia resulti bono, come pur spero. Vero è che da quatro over sei zorni in qua ne sono infredato nel pecto che me fa tossere assai spesso del qual redore sono migliorato e penso debia durare pocho, havendolo però per bono signo che la materia ne sia uscita fora del cervello e discesa al pec-

to perché spero me seria molto più facile ad eradicarla dal dieto peto, che da esso cervello. Unde ne piglio conforto assai pur ch'el pensiero remsa»⁷⁰.

Un imprevisto, quello, che lo fece rinunciare al progetto di recarsi il giorno di Pentecoste a Siena per ricevere dall'arcivescovo l'indulgenza plenaria che il pontefice concedeva, anche attraverso i suoi ministri, in quel giorno. Prima di muoversi aveva infatti preferito mandare lì il suo medico per un consulto, circostanze del quale riferì alla cognata.

«Sapia adoncha la prelibata Signoria Vostra come dei gratia del mio fredore pectorale pochissimo ne sento e solum uno pocheto la mattina toso e senza molestia perseverando prosperamente in tuore la doza. In effecto spero che de la testa e de dicto pecto in breve ad uno tracto me ritrovarò integralmente sincero e che ale mie vertizene haverò dato totalmente licentia cum pacto che per niente olsino più ad aproximarseme, altramente serano mal viste e recevute da mi over ch'el seria el contrario che io sarò mal tractato da loro che no me gustaria punto. Non sono andato ala indulgentia plenaria a Siena come per altra notificai ala Signoria Vostra perché dopo scissi a quella mandai a Siena predicto Messer Francesco di Acerbi a comunicare sopra li facti mei cum uno messer Bartolo medico che in essa terra ha gran

68. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 6 maggio 1461.

69. Massimo Marocchi, *I Gonzaga di Castiglione delle Stiviere. Vicende pubbliche e private del casato di San Luigi*, Verona, 1990.

70. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 17 maggio 1461.

nome et ha facte molte experientie de questi bagni e dopoi hebeno conferito insieme me riportò ad esso Messer Bartolo parere che anchora restasse per alquanti zorni qui e che se andria ala prenominata perdonanza per tornare, quello intervallo che seria stato de tri di piutosto me noceria che altramente. Unde consideratis omnibus presi partito de remanire»⁷¹.

La fama di Bartolomeo Bandini arrivava, dunque, fino a Mantova e il medico senese era tenuto in gran conto riguardo alle terapie termali, di cui era reputato la massima autorità. Perciò, viste le condizioni del suo paziente, il medico marchionale, che forse non era altrettanto esperto, preferì andare consultarsi con lui, riuscendo a convincere Alessandro a seguire scrupolosamente i suoi preziosi consigli. Ciò nonostante quel ciclo di cure non dovette giovare molto alla cagionevole salute di Alessandro, che a malincuore fu costretto a cambiare i piani che aveva per il suo viaggio di ritorno e a rinunciare di visitare Pisa per scegliere la via più breve che passava, ancora una volta, per Siena e Firenze. Anche perché, come era accaduto l'anno prima a suo nipote Federico, negli ultimi giorni di permanenza ai bagni fu colto da una

«purgatione che hebi per quello affanno di stomacho rimasi per tre o quatro zorni cum una grande lascitudine senza febre però. Unde sopranozando ancho li caldi immensi parse a Messer Francesco che non dovesse mutar proposito per non pigliare tropo stracho, allegando che etiam li bagni rescaldano mavegliosamente»⁷²

A Siena, come già ricordato, ebbe la soddisfazione di essere invitato a un sontuoso ballo a cui presero parte «gallante damiselle», mentre a Firenze, dove gli occorse un increscioso incidente – cadde da cavallo s'incrinò l'osso di un piede che gli fu sistemato con successo da un amico –, ebbe modo d'incontrare Cosimo il Vecchio e i suoi figlioli, Pietro e Giovanni. Dando conto di quell'incontro mise al corrente la cognata delle assai delicate condizioni di salute dei tre. Sebbene Cosimo gli avesse mostrato tutta la sua affezione per la casata mantovana con una «gratissima recoglienza», fu però costretto a riceverlo

«in la camera a sedere cum dui soi figlioli tutri gotosi; lui pocho e Piero suo mazor figliolo⁷³ non havevano allora le gotte, ma sono asidrati per forma che non se ponno muovere da sedere, neanche poriano cavalcare e bisogna siano portati in qua e in là. Zohane che è el minor figliolo, benché anche lui habia le gotte non è pur anchor cossi storpiato, anzi lo di del Corpo de Christo portò lo baldachino per la terra, ma la nocte seguente ge vene la gota in uno pede e in una mano, cum la quale lo ritrovai insieme cumo padre a sedere come de sopra ho detto»⁷⁴

Avrà saputo che Cosimo e i suoi figli erano pazienti di Bartolo di Tura e che questi, nei consigli che spesso loro inviava, continuava a raccomandare come miglior rimedio le cure termali ai bagni di Petriolo?

Il recupero dei Bagni di Petriolo

ripreso integralmente dal numero 497 (gennaio-febbraio 2018) del bollettino di ITALIA NOSTRA, previa autorizzazione

Bagni di Petriolo, un grande impegno di Italia Nostra

Mariarita Signorini

Presidente regionale di Italia Nostra Toscana

La Soprintendenza ha già licenziato il progetto e al momento sono state pulite le mura dalla vegetazione infestante per poter fare i rilievi archeologici. La zona, che si trova all'interno della Riserva naturale del Merse, tra le province di Siena e Grosseto, in un paesaggio naturale incontaminato, offre grandi potenzialità turistiche: si trova sulla strada dei Monasteri, vicino alla via Francigena e alla strada Romea. Vi è tutta una serie di itinerari che vanno potenziati, strade bianche cadute in disuso, divorate dalla vegetazione. C'è ancora un'antica locanda, chiusa da anni, di proprietà dell'Unipol, che verrà restaurata col loro finanziamento e che potrà prestare accoglienza. Si tratta solo di recuperare l'esistente. Non c'è niente da costruire. Ci sono anche delle terme, realizzate a fine anni '90 con un progetto poco rispettoso della bellezza dei luoghi, la cui presenza potrà essere mitigata e resa più organica alla qualità dei luoghi. Si prevede il restauro delle mura e si sta per

attuare una campagna di scavi: Petriolo infatti nel Medioevo era ricco di locande, taverne, edifici, mercati e terme pubbliche, entro una cinta muraria di presidio; la località ha avuto un periodo di grande fasto fino al XIV sec. per poi scomparire da tutti i documenti.

Adriano Paoella, che guida il progetto di recupero dei luoghi per Italia Nostra nazionale, ha da subito collaborato con le nostre sedi territoriali: per la buona riuscita del progetto preziosa è stata la cooperazione di Lucilla Tozzi, Presidente della Sezione di Siena, Michele Scola, Presidente della Sezione Maremma Toscana, e Vittorio Cambria, delegato dal regionale toscano. È stato coinvolto anche il "Comitato spontaneo degli Amici dei Bagni di Petriolo" che per primi avevano richiesto l'aiuto di Italia Nostra, segnalando il forte impatto dei cantieri per il raddoppio della Siena-Grosseto. La nostra Associazione è riuscita a tessere rapporti con Unipol e insieme ad avviare il restauro e il re-



Bagni di Petriolo, edificio delle terme antiche e chiesetta (foto di A. Paoella).

71. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 24 maggio 1461.

72. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 5 giugno 1461.

73. Non a caso Piero de' Medici (Firenze, 14 giugno 1416 – Ivi, 2 dicembre 1469), padre di Lorenzo il Magnifico, era soprannominato il Gottoso.

74. Lettera di Alessandro Gonzaga alla marchesana Barbara del 23 giugno 1461.



PROSPETTO LATERALE (VERSO IL FIUME) in scala 1:100

Bagni di Petriolo, edificio delle terme antiche e chiesetta (foto di A. Paoletta).

cupero dell'intero complesso, e a svolgere indagini storiche e archeologiche coinvolgendo le Università di Milano, Firenze e Siena. La ricaduta terri-

toriale ci sarà anche in termini di credibilità per la nostra Associazione che dimostrerà così di poter svolgere azioni propositive di grande respiro.

Il turismo ambientale in Toscana è molto sviluppato, rammentiamo a questo proposito il treno Natura della ex Provincia di Siena: una ferrovia turistica della prima ora!

Un esperimento di conservazione e valorizzazione

Adriano Paoletta

Consulente scientifico Italia Nostra

I Bagni di Petriolo sono un bene unico nel patrimonio del nostro Paese, non solo per l'impianto murario dell'inizio del Quattrocento con torri e porta che cinge un ettaro di terreno in cui sono collocate le vasche termali usate da papa Enea Silvio Piccolomini e dove le recenti indagini archeologiche hanno rinvenuto i resti di numerosi edifici medioevali, ma anche per l'elevato pregio naturalisti-

co dell'area insediata sulle sponde del Farma e con le sorgenti di acqua sulfurea a 42° che si riversano nel fiume. Una meraviglia culturale e ambientale, da sempre utilizzata dalle comunità locali, che però negli ultimi decenni ha subito un degrado così profondo da comprometterne la fruizione.

Italia Nostra, che da tempo segue l'evoluzione dei luoghi e con la Sezione di Siena ha più volte



Porta Siena (foto Adriano Paoletta).



Locanda (foto Adriano Paoletta).

evidenziato la necessità di interventi di tutela, ha cercato di trovare una modalità per salvaguardare e valorizzare il bene partendo dall'interpretazione delle dinamiche sociali che avevano causato tale condizione di abbandono. Il metodo predisposto si richiama alla Convenzione di Faro e ipotizza, come recita la convenzione europea, che non vi possa essere la salvaguardia e la valorizzazione di un bene se non vi è la piena partecipazione delle comunità le quali, se consapevoli del proprio patrimonio, possono divenire i principali custodi del bene.

L'attenzione si è concentrata sulle cause del degrado e su come si potessero ricomporre le condizioni che avevano permesso, in un recente passato, di considerare il bene un patrimonio comune e la cui mancanza aveva fatto divenire i Bagni terra di nessuno.

Per molti mesi Italia Nostra ha lavorato con gli operatori, le amministrazioni, le associazioni locali, per contribuire a convogliare le tante energie positive in un progetto organico e ha elaborato un documento di prefattibilità in cui ha indicato come le attività di competenza e di interesse di ciascun soggetto possano confluire in un quadro unitario e comune di salvaguardia.

Unipol-Sai Sgr, proprietaria del bene, ha, con lucidità e passione, intuito che questa poteva es-

sere una strada per riqualificare l'area e ha deciso di investire nel progetto, completato a dicembre 2016, e nella realizzazione degli interventi di restauro, il cui primo lotto sarà avviato nei prossimi mesi.

Ma non è solo Unipol che può e deve operare per la salvaguardia e la valorizzazione del bene. Italia Nostra ha predisposto infatti un Master Plan in cui si individuano altri interventi, afferenti ad altri soggetti, altrettanto necessari come quelli di restauro: organizzazione della viabilità e parcheggi, navette, servizi, sicurezza, ma anche tutela delle mura e dell'impianto termale storico dalle piene (che si sono succedute in maniera abbastanza anomala negli ultimi anni), ripristino delle strade e spiazzi del cantiere di una grande infrastruttura stradale prossima al bene.

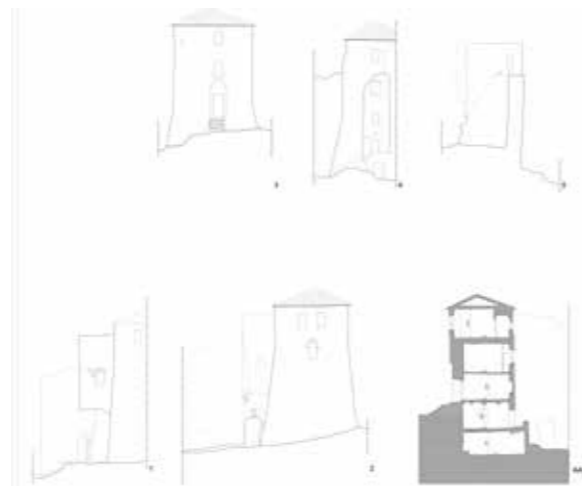
Tutto ciò fa parte del progetto di valorizzazione così come l'organizzazione della fruizione dell'area, in un "racconto del territorio" che non può ignorare la vicinanza di San Galgano, Sovicille e del museo della biodiversità di Monticiano, ma anche la promozione degli operatori turistici, ristoratori e agriturismi che possono trovare nella riqualificazione dell'area un ottimo strumento di sostegno alle attività.



Ipotesi di sistemazione temporanea della fruizione e sistema degli itinerari (rendering e infografiche Yourban Mob).

Quanto si sta facendo si relaziona ai criteri di pianificazione dei siti ipotizzati dall'Unesco e di questi ne è stata interpretata la richiesta di attenzione alle condizioni culturali, ambientali e sociali del territorio in cui il bene conservato si situa.

La Soprintendenza di Siena e le amministrazioni comunali di Monticiano e Civitella Paganica, direttamente interessate, e dell'intera Val di Merse, a partire da Sovicille e Chiusdino, seguono con interesse quanto in atto e sostengono l'azione di Italia Nostra che ha impostato un laboratorio che si ritiene possa portare a risultati anche più significativi di quelli, già molto qualificanti, fino adesso raggiunti.



Torre Nord (disegno Massimo Bottini).

L'acqua "libera" come identità del luogo

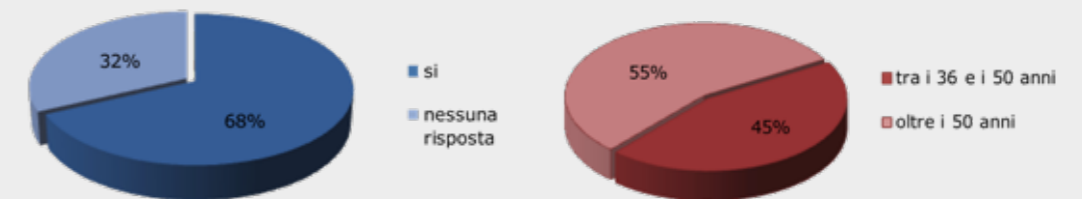
Raniero Maggini
Consulente Italia Nostra

La scommessa per il futuro dei Bagni di Petriolo inizia tre anni fa, i primi passi furono mossi sulla scorta di interviste con alcuni interlocutori privilegiati dalle quali emersero importanti indicazioni.

Da sempre i Bagni di Petriolo sono fruiti liberamente da un largo pubblico, un elemento che caratterizza il luogo per come conosciuto e per come un ampio campione di residenti auspica continuerà ad essere conosciuto. È quanto emerso nella fase d'indagine che ha preceduto la definizione della fattibilità progettuale sul recupero e la riqualificazione del sito. È il dato attorno al quale è stato costruito il progetto esecutivo e che ne ha consentito un'ampia condivisione. L'importanza e il valore dell'area è infatti strettamente connessa nella percezione dei fruitori delle acque termali al libero accesso, a sentirsene garanti e tutori. Ne emerge una dimensione del bene comune che lega in modo inscindibile la conservazione del bene culturale e la tutela delle risorse naturali. Un dato trasversale tra le diverse categorie sociali contattate, indipendentemente dall'età e dal sesso degli intervistati.

I giovani per Petriolo

Il dato anagrafico del campione dei residenti intervistati, scelto tra interlocutori privilegiati, individuando operatori nel settore dell'accoglienza e della ristorazione, associazioni impegnate sul territorio ed amministratori locali, evidenzia la necessità d'intercettare e favorire la partecipazione dei più giovani. È proprio l'obiettivo che Italia Nostra intende raggiungere contestualmente all'avvio delle attività di restauro. Grazie alla disponibilità degli esperti coinvolti nella fase di costruzione progettuale, verrà realizzato un percorso formativo per consentire anche a ragazzi non laureati l'accesso ad un ricco patrimonio di conoscenze e permettere la narrazione delle iniziative in corso, la storia e la natura dei luoghi.



Per il 68% degli intervistati la fruizione libera delle acque termali è un elemento caratterizzante del luogo.

Identità del campione intervistato.

Terme di pontefici e imperatori

Anna Guarducci*, Andrea Arrighetti**, Barbara Gelli**

* Università di Siena, consigliere di Italia Nostra Siena

** Università di Siena



Una delle quattro torri angolari della cinta muraria quattrocentesca, trasformata in un periodo successivo in abitazione.

Attraverso l'analisi della documentazione archivistica e l'indagine archeologica è stato possibile aggiungere un nuovo contributo per la ricostruzione della storia di Petriolo a partire dal XIII secolo, mettendo in luce fasi diverse e alterne fortune di questo importante sito. Sono così emersi alcuni interessanti scenari relativamente a questo peculiare contesto insediativo, economico e sociale che, nel corso del basso medioevo, si affermò come una delle più importanti stazioni termali d'Italia, nota in tutta Europa.

Tra il XIV ed il XV secolo le proprietà terapeutiche delle acque di Petriolo furono citate nei principali trattati medici e i Bagni accolsero i soggiorni di personaggi illustri come il pontefice Pio II, autorevoli esponenti di casa Medici e Gonzaga, i comandanti militari Niccolò Piccinino e Federico da Montefeltro o l'imperatore tedesco Sigismondo di Lussemburgo.

Le fonti documentarie hanno permesso di definire come alla base del successo delle terme vi fosse l'interesse delle autorità senesi, che posero Petriolo al centro di un importante piano di sfruttamento economico e di valorizzazione urbanistica. In questo modo i Bagni di Petriolo furono in grado di garantire una ricettività talmente elevata da rendere la stazione termale alla stregua di un vero e proprio villaggio: chi vi si recava per la balneazione poteva infatti contare su numerose strutture e servizi per l'alloggio, lo svago e la ristorazione. In età moderna, la caduta della repubblica senese e il passaggio al Granducato di Toscana condussero le terme alla decadenza e le nuove autorità decisero di non curarsi più della manutenzione del sito.

Attraverso le relazioni dei tecnici e le testimonianze dei numerosi viaggiatori che si alternarono tra il XVII ed il XIX secolo, nonché attraverso l'esame di fonti documentarie pubbliche e priva-



Catasto Leopoldino (1821), particolare con l'insediamento fortificato di Petriolo.

te (come le guide turistiche del XX secolo), è stato poi possibile documentare anche le varie fasi di crisi e di decadenza della stazione termale e tratteggiare il progressivo stato di degrado degli edifici sino a una, sia pur timida, ripresa a inizio Novecento.

L'analisi storico-archeologica condotta sulle mura, sulle terme storiche e su ciò che attualmente rimane del ponte antico ha permesso di fornire un quadro sufficientemente esaustivo dei sistemi costruttivi adottati dal Quattrocento a oggi per l'edificazione e la modifica della struttura materiale del sito. In questo modo è stato possibile definire i caratteri peculiari dell'architettura dei manufatti, fornendo una visione precisa dell'uso e delle caratteristiche delle singole porzioni. Sono questi dati essenziali che, una volta integrati con le analisi condotte al di sotto del piano di campagna mediante scavo archeologico, permettono di comprendere i modi di costruire e di abitare nel corso del tempo in una zona strategica dal punto di vista commerciale, economico e politico.

Risultati e prospettive per la ricerca archeologica

Serena Massa*, Susanna Bortolotto**, Piero Favino**, Andrea Garzulino**

* Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, già consigliere di Italia Nostra Milano

** Politecnico di Milano

La scarsità di notizie, o meglio la quasi assenza di documentazione antecedente al periodo medievale, ha motivato il progetto di ricerca archeologica nell'area del Castello di Petriolo.

Indagare il contesto in cui si inseriscono i resti del Castello con gli strumenti dell'archeologia può significare non solo recuperare e valorizzare strutture sommerse pertinenti al complesso fortificato, ma metterne in luce la relazione con il paesaggio. Ciò permetterà di contestualizzare le origini del sito medievale nel quadro più ampio dell'evoluzione del popolamento nel territorio e della formazio-

ne e trasformazione del tessuto insediativo, sociale e produttivo di cui ad oggi si coglie unicamente la fase tardo medievale, caratterizzata dai resti del patrimonio architettonico conservato in elevato.

Con l'obiettivo di ampliare le conoscenze relative a questo patrimonio è stata programmata, in accordo con la Soprintendenza, una ricognizione archeologica di superficie, pianificata in base a un percorso di indagine realizzato con diversi strumenti: raccolta e analisi delle informazioni edite su base bibliografica e cartografica, comprendenti l'esame di dati significativi individuati nelle foto



Bagni di Petriolo, panoramiche delle vasche con accesso libero a ottobre 2014, prima delle piene del 2015 e 2017 (foto Adriano Paoletta).

aeree e verificati al suolo; ricognizione sistematica di superficie in un'area campione più estesa di quella direttamente interessata dal Castello.

L'acquisizione delle evidenze archeologiche e morfologiche presenti nell'area del Castello, al fine di produrre una "Carta Archeologica" preliminare alla programmazione di scavi archeologici, operativamente si è svolta con le seguenti fasi: raccolta dati cartografici ed archeologici del Castello (circa 10 ettari) e del contesto territoriale circostante; analisi dei dati cartografici e archeologici; strutturazione GIS e georeferenziazione della cartografia raccolta e dei dati archeologici elaborati; indagine archeologica (*survey*) in situ; schedatura delle evidenze archeologiche (puntuali e areali) e collocazione con coordinate GPS; inserimento dei dati dell'indagine nel GIS (Geographic Information System) per la carta archeologica di Petriolo.

La strategia del *survey* o ricognizione archeologica di superficie è stata definita sulla base delle caratteristiche geomorfologiche dell'area e della documentazione disponibile, censita e analizzata per individuare le aree di maggiore o minore probabilità archeologica. La densità di edifici documentata dalle fonti archivistiche soprattutto per il XV secolo ha determinato la scelta di un metodo di ricognizione intensivo, che potesse colmare l'apparente attuale 'vuoto' di evidenze materiali all'interno dell'area fortificata del castello.

La ricognizione sistematica delle aree esplora-

bili ha portato al rinvenimento di numerosi resti di strutture in pietra affioranti in superficie e/o in sezioni esposte dei pendii, all'individuazione di tratti morfologici regolarizzati artificialmente, mentre si è riscontrata la totale assenza di reperti mobili affioranti in superficie.

Sono stati riconosciuti 41 punti significativi all'interno e all'esterno della cinta fortificata, tra i quali l'individuazione di setti murari e di resti di murature contigue disposte ad angolo è di particolare importanza per programmare i futuri interventi di scavo archeologico. I punti diagnostici sono stati registrati su schede che comprendono tutte le informazioni utili alla geolocalizzazione e analisi dei dati, secondo la normativa del Ministero per i Beni e le Attività Culturali predisposta dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione specificamente per le Ricognizioni Archeologiche.

Inizia pertanto ad avere un riscontro su base archeologica la realtà dell'insediamento quale conosciamo dalle testimonianze presenti nelle fonti archivistiche a proposito della presenza di edifici all'interno della cinta fortificata, della loro funzione, spesso della loro proprietà.

Più precisamente, all'interno della cinta fortificata dovevano trovarsi: il palazzo del podestà, la piazza pubblica, l'edificio per la riscossione delle tasse, alberghi, case signorili, il bagno degli uomini, il bagno delle donne, il bagno detto "grotta" e un quarto stabilimento che si trovava più in alto,



Cinta muraria, esempi della situazione delle murature (foto Adriano Paoletta).

un po' più distante dal Farma, la cappella di San Niccolò, le abitazioni dei religiosi, la fontana, vicina al bagno delle donne.

Per poter procedere all'individuazione di futuri sondaggi archeologici si è valutato - partendo da questa base conoscitiva - di suggerire delle *fasi di*

avanzamento della ricerca e ulteriori indagini che possano essere utili sia per una maggiore comprensione del luogo come bene culturale complesso, sia per una consapevole valorizzazione del sito rifunzionalizzato come parco archeologico/ambientale, sito termale e museo di sé stesso.

Le varie fasi del recupero

Giovanni Minutoli, Stefano Bertocci

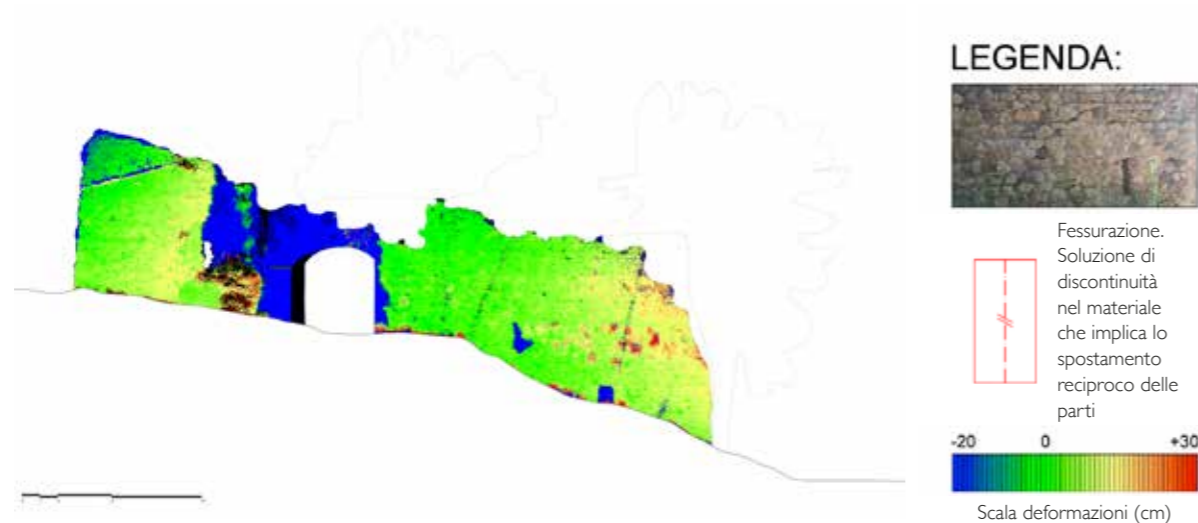
Università di Firenze, Dipartimento Architettura

Il progetto si muove all'interno del quadro delle conoscenze e delle metodologie contemporanee messe a punto dal settore scientifico disciplinare del restauro conservativo, seguendo i criteri del restauro archeologico (in ottemperanza del DM. 14.01. 2008, *Norme tecniche per le costruzioni*).

La fortezza di Bagni di Petriolo, di forma quadrangolare, presenta ancora tre torri di cui due angolari e una al centro del lato lungo. Una sola porta è ancora esistente e i resti di un ponte fortificato danno l'idea dell'importanza dell'abitato in essa contenuto.



Analisi per il restauro delle mura, rilievo con "nuvole di punti" (progetto Giovanni Minutoli).



Analisi per il restauro delle mura, rilievo con "nuvole di punti" (progetto Giovanni Minutoli).

Tutti gli edifici sono in muratura mista, realizzati con pietrame sbozzato su letti di malta di calce. In alcune sezioni murarie a vista si nota l'inserimento di dormienti lignei a vari livelli utili a rinforzare le murature. Questo tipo di paramento presenta un'elevata "fragilità" dovuta all'esaurimento del legante e alla presenza di un palinsesto murario senza elementi di connessione tra le due diverse facce della muratura.

Il rilievo di un complesso come quello di Bagni di Petriolo è un'operazione soggetta a errori e imprecisioni, dovuti sia alla complessità morfologico-altimetrica, sia agli errori che possono verificarsi durante il processo di acquisizione e messa a registro, causati anche dalla folta vegetazione presente. La realizzazione della campagna di rilievo è stata effettuata utilizzando varie metodologie: rilievo topografico, laser scanner e fotogrammetrico. La restituzione dei dati¹ ha consentito di realizzare gli ortofotopiani da cui ottenere le tavole tematiche relative al degrado e alla descrizione materica dei fronti.

Le indagini stratigrafiche, realizzate in fase di progetto preliminare, verranno finalizzate al campionamento delle malte individuate nelle singole unità stratigrafiche, in maniera da costituire una banca dati che servirà per la scelta delle malte idonee all'intervento di restauro. La grande presenza di vegetazione infestante richiede che in maniera preliminare vengano fatti interventi di pre-consolidamento che evitino la possibilità di crolli durante l'estirpazione dei rampicanti.

A seguire si procederà con la pulizia dei fronti e l'eliminazione della vegetazione, dopo queste due prime azioni si procederà con la realizzazione dei quattro principali interventi di consolidamento: inserimento di diatoni (elementi di consolidamento della struttura muraria, ndr.) a espansione; reintegrazione delle murature crollate; ricucitura delle murature con intervento di "cuci e scuci" in prossimità delle lesioni; iniezioni di malte fluide appositamente individuate. L'ultima operazione prevista sarà la ricomposizione dell'immagine dell'edificio tramite la sigillatura-stilatura dei giunti.

1. La restituzione dei dati in formato dwg è stata eseguita esportando immagini raster scalate e referenziate automaticamente dal software. La loro digitalizzazione all'interno di ambienti CAD ha prodotto elaborati altamente descrittivi, i quali sono stati a loro volta esportati per realizzare gli ortofotopiani.

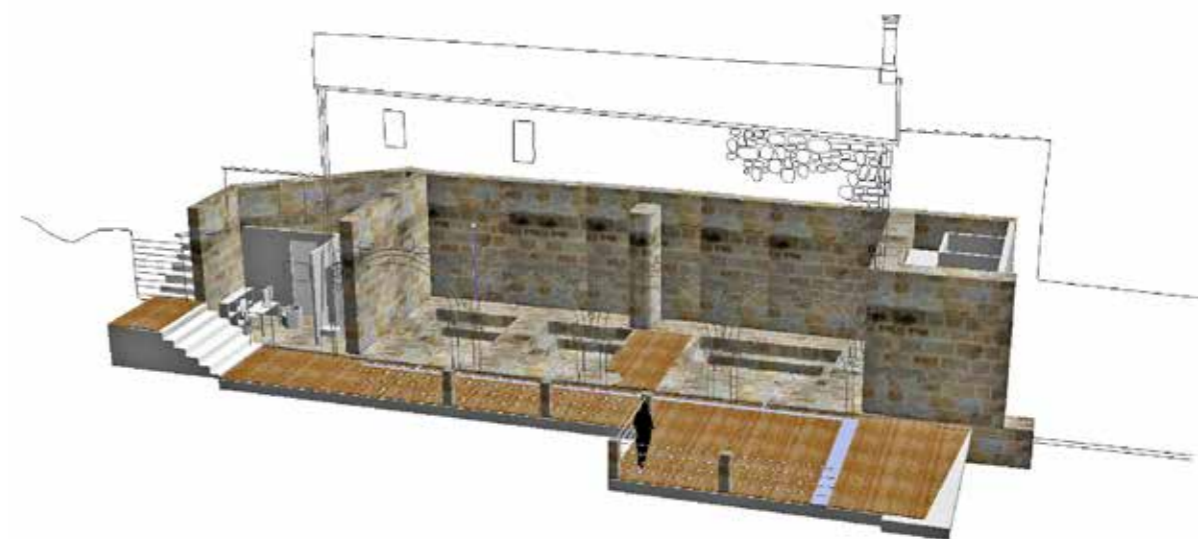
Un progetto per ricreare l'armonia del luogo

Massimo Bottini

Architetto, presidente di Italia Nostra Valmarecchia

Il compendio delle antiche terme di Petriolo è un luogo fortemente identitario del territorio senese che ormai da anni vive una condizione di quiescenza. L'intervento previsto prenderà forma in quello spazio utilizzando tutte le conoscenze, le componenti, le variabili raccolte anche grazie alla partecipazione delle comunità e alle loro segnalazioni. Lo spazio ritornerà luogo capace di instaurare una relazione di scambio continuo con tutti coloro che lo frequenteranno. L'opera di restituzione inizierà dalla Torre e dalla Locanda, i due elementi dentro e fuori le mura dell'antico castellare. Essi verranno trattati come parti di un complesso architettonico, paesaggistico e naturale che costituisce un organismo in cui è impossibile pensare al tutto scisso dalle singole parti. Occuparsi della parte significa quindi agire sull'intero.

Gli interventi che da ambiti diversi si incroceranno con il luogo nella sua complessità agiranno per riannodare i fili del racconto del luogo. La Torre nella sua verticalità diventerà "visione d'insieme". All'interno il viaggiatore avrà la possibilità di trasformare il proprio sguardo, potrà meravigliarsi, stupirsi e diventare consapevole di come è parte di quel luogo, inteso nella sua totalità, e di come con esso intrattenga un rapporto di scambio. L'intervento sulla Locanda restituirà all'edificio, pesantemente maneggiato negli anni settanta, la sua identità. Le sette stanze saranno luoghi di rigenerazione per i viaggiatori ma allo stesso tempo dialogheranno anche con ciò che è fuori, creando un rimando continuo al luogo. Gli avventori verranno così indotti ad entrare nel flusso della narrazione e ad arricchirla. Un tipo di turismo sostenibile e attivo capace di valorizzare e tutelare il compendio termale.



Edificio delle terme antiche, ipotesi di sistemazione (progetto Massimo Bottini).

La Tomba etrusca delle foglie d'oro nei pressi dell'area termale di Petriolo: tra Archeobotanica e Storia

Claudio Milanesi

Università di Siena, Dipartimento Scienze della Vita, Laboratorio Archeobotanico, Via Mattioli 4, 53100 – Siena
claudio.milanesi@unisi.it

I vegetali celano conoscenze e memorie appartenenti a culture e tempi lontani. Sulle piante sono fiorite leggende e credenze popolari che narrano delle loro origini, delle loro proprietà e dei loro impieghi; addirittura alcune di esse mantengono impronte umane in legami che spesso condividono origini divine, soprannaturali e mitiche. Le varietà erbacee, arbustive e arboree si sono o sono state adattate ad ambienti manipolati da una persistente attività umana e l'Archeobotanica cerca di ricostruire a ritroso quest'antico legame.

Introduzione

I depositi sedimentari, che testimoniano un paesaggio in continua evoluzione a causa dei cambiamenti climatici e dei movimenti tettonici, opportunamente trattati possono liberare pollini e spore (palinologia), semi (carpologia), carboni (antracologia) o frammenti vegetali. Il riconoscimento delle antiche varietà botaniche assume importanza se non altro per le numerose deduzioni che da esso si possono trarre: ad esempio, la ricostruzione dei diversi habitat e del loro rapporto con le comunità umane, nonché quella delle attività necessarie per la loro coltivazione e delle connessioni tra gli incroci voluti dall'uomo e le variazioni spontanee. Una ricerca, quella dell'Archeobotanica, che è in grado di proiettarci indietro nel tempo indipendentemente dalla storia dei grandi eventi illustrata dalle fonti scritte. Il presente articolo vuol mostrare i risultati ottenuti in questo campo riguardo al rinvenimento, alcuni

chilometri a sud dell'area termale di Petriolo (essa è ubicata al confine tra i comuni di Monticiano e Civitella Paganico, rispettivamente in provincia di Siena e in quella di Grosseto), di una importante tomba etrusca.

La Tomba delle foglie d'oro

Il territorio che da Civitella Marittima (329 m s.l.m.), attraverso Casal di Pari (481 m s.l.m.), giunge nelle località Imposto (312 m s.l.m.) e Santo (224 m s.l.m.) del Comune di Monticiano, è caratterizzato da un paesaggio collinare dove domina una rigogliosa vegetazione boschiva (quereti e castagneti) testimoniante un clima mediterraneo. Il Torrente Farma, che nasce nei dintorni di Roccatedereghi a quota 475 m s.l.m., lo attraversa da ovest verso est fino ad immettersi nel Fiume Merse incidendo profondamente la valle entro cui si snoda. In corrispondenza dell'alveo del torrente è rilevabile la faglia di Petriolo, mentre perpendicolarmente a essa si sviluppa quella delle Caldanelle. Lungo le due fratture vi sono risalite di fluidi idrotermali che alimentano le sorgenti dei Bagni di Petriolo e delle Caldanelle. L'area, che oggi conserva aspetti naturalistici non contaminati da attività umane, ha offerto opportunità abitative fin dall'epoca etrusca (sono state rinvenute testimonianze, sia nel versante grossetano che in quello senese) e, forse, anche prima. In ogni caso, è dall'epoca etrusca che è accertata in zona la connessione tra presenza umana e uso delle acque calde; esempi in questo senso sono

forniti dagli insediamenti sorti in corrispondenza di antiche stazioni termali nei territori di Saturnia, Chiusi sino a Musarna nell'alto Lazio. Da rilevare inoltre che la Valle dell'Ombrone, via naturale di penetrazione dalla costa tirrenica verso l'entroterra senese e volterrano, conduce prima al punto dove il fiume riceve il Merse e poi direttamente alle sorgenti di acqua calda di Petriolo; sembra logico, quindi, pensare del tutto scontata una sosta in questi luoghi per i viandanti del tempo non solo per "piacere" ma anche per "cura", visto che le acque raggiungono una temperatura di circa 43°C e sono ritenute, per la ricchezza in zolfo, in grado di alleviare i disturbi del sistema respiratorio.

L'Associazione Odysseus, nata a Casal di Pari nel 2007 su iniziativa di un gruppo di giovani studiosi, ha come scopo primario quello di scoprire, valorizzare e salvaguardare il patrimonio archeologico della Toscana meridionale. Nel 2013 alcuni suoi volontari hanno individuato in

località Casenovole (43° 2.147' N e 11° 19.802' E), nei pressi dell'omonimo castello di epoca medievale posto lungo la strada che da Fércole conduce a Monte Antico (Foto 1), un corridoio (*dromos*) scavato nella roccia che poteva introdurre a una tomba etrusca. La rimozione degli strati



Foto 1. L'area del Castello di Casenovole, di fronte al Monte Amiata, dove si ritrova il sito archeologico



Foto 2. Dromos della tomba dalle foglie d'oro



Foto 3. Lastra di chiusura della tomba

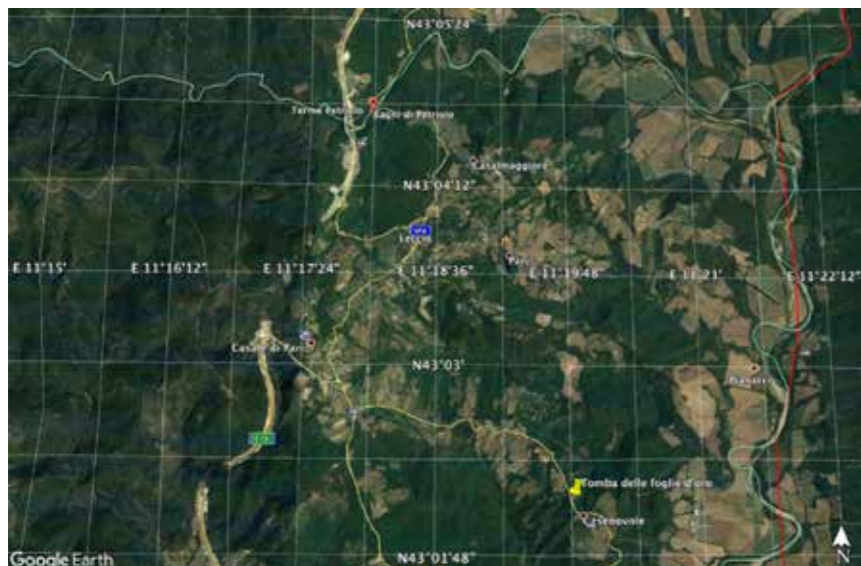


Fig. 1. Ubicazione della Tomba delle foglie d'oro nel contesto dei siti etruschi

sedimentari che lo ricoprivano è iniziata nell'ottobre 2014; dopo circa un anno di collaborazione con la Sovrintendenza ai Beni Culturali della Toscana, il *dromos* di accesso alla sepoltura (Foto 2) è stato liberato ed è stata raggiunta la camera funeraria sigillata da una lastra calcarea (Foto 3). La tomba, scavata in arenarie compatte di origine marina da ricondurre al Terziario (Fig. 1), era chiamata "delle foglie d'oro" perché al suo interno sono state ritrovate piccole lamine dorate; datata al IV-III secolo a.C., essa fa parte di una necropoli che testimonia la presenza di insediamenti etruschi in zone prossime alle sorgenti termali. Da rilevare che in passato la tomba è stata violata attraverso un cunicolo scavato dall'alto dai profanatori e che questo ha consentito un lento riempimento pluviale e detritico della camera sepolcrale.

Per gli Etruschi la nascita e la morte erano accomunate dall'imprevedibilità della loro comparsa ed erano messaggere rispettivamente di gioia o grande dolore (Criniti, 1997). Nell'immaginario collettivo questi eventi erano associati alla madre-terra, pronta ad accogliere nel suo grembo germogli e piante secche. Per mantenere il contatto con l'entità che avrebbe dovuto alla fine riceverlo, alla nascita il neonato uscito dal grembo materno era adagiato a terra (Criniti, 1997). Alla

morte l'estinto riceveva una degna sepoltura in luoghi posti al di fuori delle mura cittadine; per i fanciulli, i genitori sgomenti esprimevano la segreta speranza di una nuova rinascita offrendo alla terra doni (Goody, 1993). Credendo ad una forma di sopravvivenza terrena del defunto, nella tomba si tendeva a riprodurre l'abitazione del morto per cui spesso vi s'introducevano ornamenti e oggetti di uso quotidiano, che riflettevano lo *status* familiare, comprese scorte di cibi e bevande. La memoria dei vivi esorcizzava la morte promettendo immortalità in terra; se da un lato i funerali, peraltro svolti in corteo, servivano a garantire l'illusione della sopravvivenza terrena, dall'altro erano utili ai viventi come modelli di comportamento esistenziale all'insegna del valore (Valenza-Mele, 1991).

Tecniche di campagna e di laboratorio

Dopo aver individuato i confini del sito archeologico, all'interno dell'area di scavo, sono stati evidenziati i vari livelli litologici (Fig. 2) da sottoporre a campionatura: quelli da 1 a 44 ricoprono dal piano di calpestio sino all'ingresso della tomba, quelli da 45 a 58 corrispondono all'apertura sul tetto praticata dai profanatori.

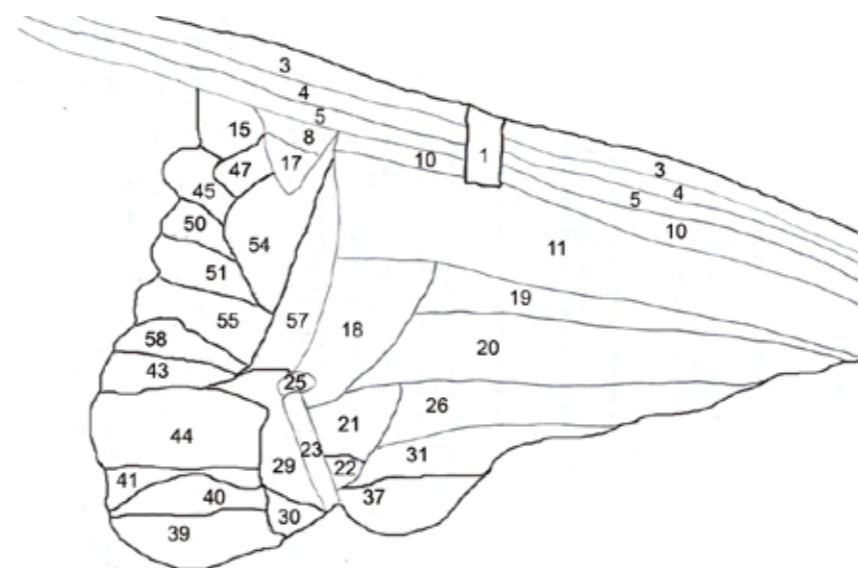


Fig. 2. Schizzo sezione longitudinale dell'area di scavo mostrante i livelli litologici campionati

Per il recupero di pollini e spore, 30 g di ciascun campione del deposito sono stati sottoposti a trattamenti chimici in laboratorio seguendo il metodo descritto da Girard & Renault-Miskovsky (1969). Le sostanze chimiche impiegate sono l'acido cloridrico per lo scioglimento delle parti inorganiche, l'acido fluoridrico per il disgregamento delle parti silicee e l'idrossido di sodio per la scomposizione delle parti organiche. Da notare che con il procedimento chimico usato la morfologia delle pareti dei pollini e delle spore (contengono sporopollenina, una sostanza molto resistente) non è stata modificata. Al fine di ottenere una migliore concentrazione dei palinomorfi, il residuo è stato flottato con ioduri fluidi (Goeur & Beaulieu, 1979) di uguale densità. Dopo essere stati condensati, i pollini e le spore sono stati inclusi in glicerina e poi montati su vetrini per essere visionati. Il loro riconoscimento, con microscopio a luce trasmessa Zeiss Axiophot 400, è stato fatto mediante comparazione con collezioni coeve presenti nel nostro laboratorio archeobotanico. Per i carboni, selezionati tramite setacciamento e flottazione delle unità litologiche considerate, l'architettura anatomica dei tre piani di frattura (trasversale, radiale e tangenziale) è stata osservata con un microscopio ottico a luce trasmessa Bausch & Lomb SZ-6 plus.

Risultati analisi

PALINOLOGIA

I campioni prelevati dal fondo della tomba hanno fornito pollini mal conservati e quantitativamente scarsi (circa 15 p/g); negli stessi campioni, viceversa, è stata riscontrata un'abbondanza di spore della divisione *Ascomycota* che è indicativa della presenza di suoli umidi con ristagni di acque reflue. Granuli pollinici corrosi e spore fungine sono stati ritrovati all'interno dello strato sommitale del *dromos*, mentre pollini di margherita (*Leucanthemum vulgare*), *Veronica* L., *Primula* L., *Papaver rhoeas* L. e *Campanula* L., tipici di suoli coltivati, sono stati individuati nel riempimento del *dromos* più a ridosso della tomba. Pollini attuali di *Gramineae*, *Urtica* e *Parietaria* (caratterizzanti luoghi naturali antropizzati) sono stati infine rintracciati nei campioni di terreno superficiale sopra la tomba e all'interno della cavità scavata dai profanatori.

ANTRACOLOGIA

Alcuni livelli litologici più superficiali hanno mostrato la presenza di carboni di leccio (*Quercus ilex*) contenenti, fra una fibra e l'altra, filamenti di ife fungine carbonizzate; evidentemente il le-



Foto 4. Inumati in prossimità dei vasi ceramici



Foto 5. Fibre vegetali e frammenti di mica all'interno dei vasi

gno, rimasto a terra, era stato prima attaccato da funghi lignivori e dopo utilizzato secco per attività da focolare. In altri livelli sono stati rilevati diversi frammenti di carbone dalle dimensioni comprese tra 2 mm e 6 cm; essi sono stati riferiti a fusti o grossi rami non solo di leccio, ma anche di quercia (*Q. robur*), roverella (*Q. pubescens*) e ginepro (*Juniperus*). I carboni al di fuori della tomba sono risultati in buono stato di conservazione; sul fondo della camera sepolcrale, invece, sono stati osservati solo aggregati di polvere di carbone.

IL CONTENUTO DEI REPERTI CERAMICI

Nella camera sepolcrale, vicino agli scheletri degli inumati (Foto 4), sono stati rinvenuti alcuni vasi ceramici contenenti frammenti di mica (per l'alto valore di refrattarietà era già usata da egizi, greci e romani durante la produzione di ceramica da fuoco) e fibre vegetali (Foto 5) collegabili a foglie o a rami giovani. Le analisi di laboratorio del materiale, che ricopriva le fibre vegetali, hanno rilevato la presenza di spore fungine e microorganismi (Foto 6), ma non quella di pollini. Nei vasi non sono stati trovati carboni o elementi carpologici.

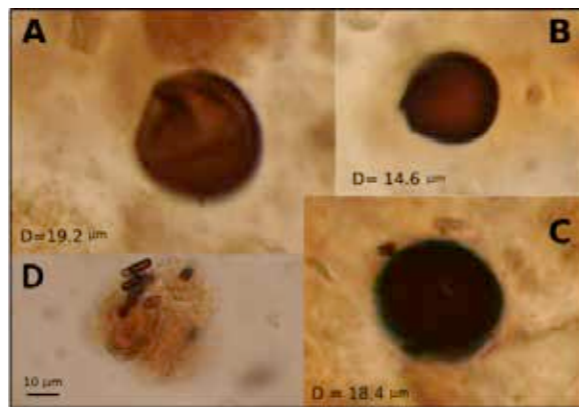


Foto 6. Spore fungine (A, B, C) e microorganismi (D) identificati all'interno dei vasi

Conclusioni

La necropoli etrusca, posta a sud delle Terme di Petriolo, testimonia l'esistenza d'insediamenti locali legati alle peculiarità dell'area. Fra l'altro, è ben noto come numerosi centri abitativi siano in epoca etrusca sorti in corrispondenza di stazioni termali. La Tomba delle foglie d'oro, che fa parte della necropoli suddetta, è stata in passato violata. Per far ciò i profanatori avevano scavato un'apertura sulla sommità della tomba per cui,

con il passare del tempo, questa era stata allagata dalla pioggia e riempita da detriti. La profanazione, quindi, aveva creato all'interno della camera un ambiente umido con acque stagnanti, responsabile della presenza di spore fungine (Milanesi *et al.*, 2006). Le analisi dei vari livelli litologici che circondavano e ricoprivano la tomba, hanno messo in evidenza pollini di graminacee, margherite, veroniche, primule, papaveri e campanule; essi caratterizzano suoli interessati da colture anche stagionali e da prati erbicoli o da pascolo. Sono stati altresì individuati pollini e carboni di specie arbo-

ree di leccio, quercia, roverella, ginepro, i quali avvalorano l'ipotesi che la tomba fosse posta ai margini dei campi coltivati e in prossimità di una fitta boscaglia sempreverde con larga rappresentanza di leccio associato ad altre essenze arboree e arbustive della macchia mediterranea. In altre parole, i dati ottenuti dallo scavo e da altre ricerche archeologiche dimostrano che sin dall'antichità il territorio era a vocazione prevalentemente agricola e molto attivo. Anche oggi, come allora, la zona è ricca d'insediamenti rurali che riconoscono nell'area termale di Petriolo un centro d'interesse.

Ringrazio il Dott. Lucas Dugerdil (Ecole normale de Lyon) per le analisi palinologiche eseguite, il Dott. Andrea Marcocci e la Dott.ssa Serenese Schifano dell'Associazione Archeologica Odysseus per il supporto tecnico fornito.

Testi citati

- Criniti N. (1997) - *Gli affanni del vivere e del morire*. Brescia, 93 pp.
- Girard M., Renaul-Miskovsky J. (1969) - *Nouvelles techniques de préparation en palynologie appliquées à trois sédiments du Quaternaire final de l'Abri Cornille (Istres, Bouches du Rhone)*. Bulletin de l'Association française pour l'Etude du Quaternaire, 275-284.
- Goody J. (1993) - *La cultura dei fiori*. Einaudi, 47-48.

- Odysseus (2007) - sito web: <http://www.odysseus2007.it>.
- Milanesi C., Vignani R., Ciampolini F., Faleri C., Cattani L., Moroni A., Arrighi S., Scali M., Tiberi P., Sensi E., Wang W., Cresti M. (2006) - *Ultra structure and DNA sequence analysis of single Concentricystis cells from Alta Val Tiberina Holocene sediment*. Journal of Archaeological Science, 33: 1081 - 1089.
- Valenza-Mele N. (1991) - *Vita dell'aldilà e corredi funebri: evoluzioni comparate*. In: Dialogues d'Histoire ancienne, 17 (2): 149-174.

NORME PER GLI AUTORI

La rivista si articola nelle seguenti parti:

LA PAGINA DELL'ACCADEMIA

Riservata a tutto quanto concerne l'Accademia delle Scienze di Siena detta dei Fisiocritici.

CONTRIBUTI

Comprende articoli sui più svariati aspetti del patrimonio naturale, con particolare riferimento a quello della Toscana meridionale.

IL PUNTO DELLA SITUAZIONE

Ospita articoli che fanno il punto su qualsiasi iniziativa riguardante la conoscenza, la tutela, la valorizzazione e la gestione del patrimonio naturale.

ORIZZONTI

Ospita idee, progetti e interventi su argomenti relativi al patrimonio naturale che meritano di essere spiegati e approfonditi.

IO, IL LETTORE

Spazio aperto per opinioni, domande, critiche, ecc.

LA PAROLA ALL'IMMAGINE

Spazio riservato a illustrazioni fotografiche su uno specifico tema di carattere naturalistico, di volta in volta indicato dal periodico.

SCHEDE NATURALISTICHE

Articoli dedicati a specifici elementi del patrimonio naturale: ad es. una specie minerale, vegetale o animale, un bosco, un ghiacciaio, un bacino fluviale, ecc.

VIAGGIANDO PER MUSEI

Sezione riservata alla Fondazione Musei Senesi e specificamente rivolta ai musei di carattere scientifico naturalistico.

ETRURI@NATURA

Spazio aperto ad argomenti relativi al patrimonio naturale con riferimento al web.

Tutti gli articoli, completi di illustrazioni e didascalie, devono essere redatti secondo le seguenti modalità:

- titolo generale: font Helvetica, grassetto, corpo 12;

- nome dell'autore/i: sotto al titolo in font Helvetica, corsivo, corpo 12;
- recapito ed eventuale e-mail dell'autore/i: sotto al nome/i in font Helvetica, tondo, corpo 12;
- il testo va caratterizzato in font Helvetica, corpo 12, interlinea 13, capoversi con rientro, titoli dei sotto-capitoli in maiuscolo non staccati dal testo successivo;
- il testo può essere fatto precedere da un flash introduttivo (non un riassunto) che ne faccia emergere il contesto di origine: scritto che dovrà essere in font Helvetica, corpo 12, interlinea 13 e indicato in colore;
- eventuali note vanno messe a fine documento prima delle citazioni bibliografiche;
- i riferimenti bibliografici nel testo vanno scritti tra parentesi con il solo cognome dell'autore/i seguito dall'anno di pubblicazione, es.: (Rossi 1982); (Rossi & Bianchi 1991); quando gli autori sono più di due: (Rossi et al. 1994, 1998);
- le citazioni bibliografiche per esteso – presentate, a seconda dei casi, come “Testi citati”, “Testi consultati” o “Testi di riferimento e approfondimento” – devono essere poste alla fine del documento. Esempi: Raup D.M. & Stanley S.M. (1971) - Principles of Paleontology. Freeman, New York; Longo G. (2007) - The Tunguska Event. Comet/Asteroid Impacts and Human Society (Bobrowsky P.T. & Rickman H., eds.), 303.330, Springer, Berlin/Heidelberg; Del Zanna P. (1989) - I fenomeni carsici nel bacino dell'Elsa, Boll. Soc. Geol. Ital., 18: 315-323; Galassi S., Rossi M. & Provini A. (1993) - Metalli pesanti e microinquinanti organici nei sedimenti e negli organismi del Po. Acqua Aria, 23 (2): 619-625. Quando i testi sono pubblicati in riviste, i titoli di queste vanno messi in tondo; seguono il numero del volume, il numero tra parentesi dell'eventuale fascicolo di volume e, dopo due punti, la pagina iniziale e finale dell'articolo collegate da una lineetta;
- le illustrazioni dovranno avere una risoluzione non inferiore a 300 dpi ed essere collocate in file separati da quelli del testo e delle loro didascalie.

Gli articoli, trasferiti su CD e accompagnati a una loro copia cartacea, dovranno essere inviati a **Etrurianatura**, Accademia dei Fisiocritici, piazzetta Silvio Gigli, 2 - 53100 Siena (tel./fax 0577.47002; e-mail: etrurianatura@unisi.it).

Il Comitato editoriale si riserva ogni facoltà di accettarli e, senza alterarne in alcun modo i contenuti, di apportarvi eventuali modifiche per armonizzarli con il carattere della rivista. In ogni caso, prima di essere pubblicati i testi saranno trasmessi via e-mail agli autori per la loro ultima revisione e approvazione.