

Laghi vulcanici

Quaderni habitat

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
Museo Friulano di Storia Naturale - Comune di Udine

coordinatori scientifici

Alessandro Minelli · Sandro Ruffo · Fabio Stoch

comitato di redazione

Aldo Cosentino · Alessandro La Posta · Carlo Morandini · Giuseppe Muscio

"Laghi vulcanici - Il fuoco, l'acqua e la vita"

a cura di Fabio Stoch

testi di

Silvia Arisci · Marcello Bazzanti · Arnaldo Angelo De Benedetti · Renato Funicello · Mauro Iberite ·
Laura Lepore · Fiorenza Gabriella Margaritora · Luciana Mastrantuono · Giuseppe Morabito ·
Michela Rogora · Marco Seminara · Fabio Stoch · Daria Vagaggini

con la collaborazione di

Raffaella Berera · Vezio Cottarelli

illustrazioni di

Roberto Zanella

progetto grafico di

Furio Colman

foto di

Nicola Angeli 47, 48 · Archivio Museo Friulano di Storia Naturale 58, 60, 61, 62, 63, 64/3, 106 ·
Andrea Balestri 64/5 · Raffaella Berera e Vezio Cottarelli 90 · Compagnia Generale Ripresearee 10, 116 ·
Vitantonio Dell'Orto 98, 107, 109, 111, 112, 114, 115, 134, 135, 137 · Giuseppe Di Lieto 113 ·
Dario Ersetti 59 · Paolo Fabbro 6, 7, 15/1, 15/2, 18, 21, 38, 40, 139 · Renato Funicello 11, 22, 132, 145 ·
Mauro Iberite 55, 64/4 · Giuseppe Ippolito 86 · Luca Lapini 108, 136 · Giuseppe Morabito 45, 51, 52, 53 ·
Giuseppe Muscio 13, 26, 41, 46 · Naturmedia 99, 102 · Roberto Nistri 64/2, 103, 105, 130, 138 ·
Fabio Stoch 9, 16, 17, 20, 23, 27, 28, 29, 33, 34, 37, 42, 43, 44, 57, 64/1, 64/3a, 65, 66, 67, 68, 69, 70,
71, 72, 73, 74, 75, 80, 84, 85, 87, 89, 92, 93, 95, 96, 97, 104, 110, 121, 122, 123, 125, 126, 129, 131,
142, 143, 144 · Damiano Vagaggini 24, 25, 35, 54, 78, 79, 88, 100, 101, 117, 118, 119, 120, 124, 128

©2007 Museo Friulano di Storia Naturale · Udine

Vietata la riproduzione anche parziale dei testi e delle fotografie.

Tutti i diritti sono riservati.

ISBN 88 88192 31 X

ISSN 1724-7209

In copertina: Laghi di Nemi e Albano, Lazio (foto Compagnia Generale Ripresearee)

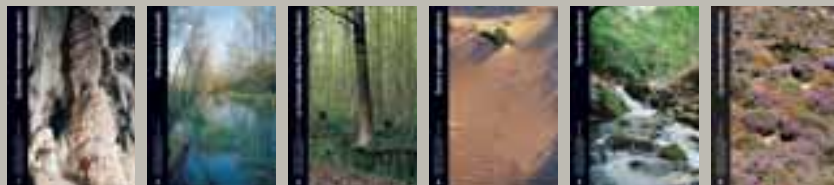
QUADERNI HABITAT

Laghi vulcanici

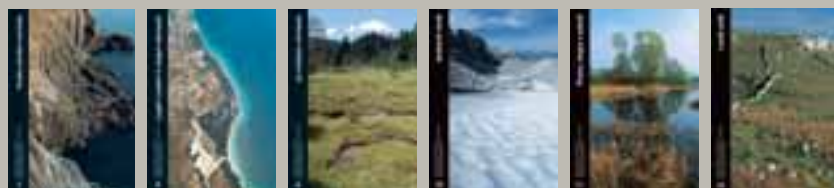
Il fuoco, l'acqua e la vita

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE
MUSEO FRIULANO DI STORIA NATURALE · COMUNE DI UDINE

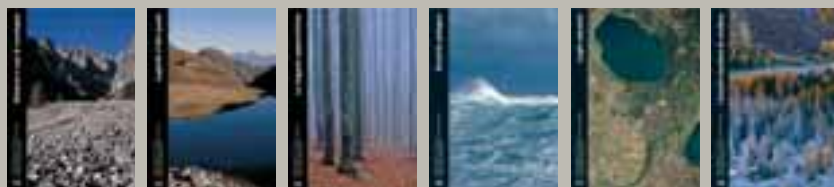
Quaderni habitat



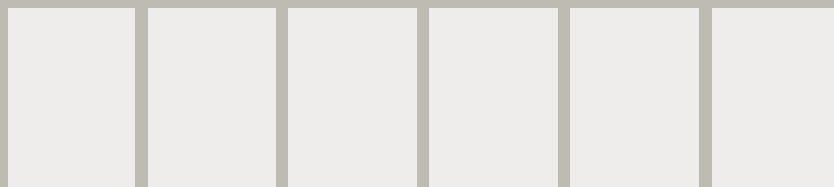
- 1 Grotte e fenomeno carsico
2 Risorgive e fontanili
3 Le foreste della Pianura Padana
4 Dune e spiagge sabbiose
5 Torrenti montani
6 La macchia mediterranea



- 7 Coste marine rocciose
8 Laghi costieri e stagni salmastri
9 Le torbiere montane
10 Ambienti nivali
11 Pozze, stagni e paludi
12 I prati aridi



- 13 Ghiaioni e rupi di montagna
14 Laghetti d'alta quota
15 Le faggete appenniniche
16 Dominio pelagico
17 Laghi vulcanici
18 I boschi montani di conifere



- 19 Praterie a fanerogame marine
20 Le acque sotterranee
21 Fiumi e boschi ripari
22 Biocostruzioni marine
23 Lagune, estuari e delta
24 Gli habitat italiani

Indice

Introduzione	7
Fabio Stoch · Daria Vagaggini	
Aspetti geologici	11
Arnaldo Angelo De Benedetti · Renato Funicello	
Idrochimica	29
Silvia Arisci · Laura Lepore · Michela Rogora	
Fitoplancon	43
Giuseppe Morabito	
Macrofite	55
Mauro Iberite	
Zooplancton	67
Fiorenza Gabriella Margaritora · Daria Vagaggini	
Zoobentos	79
Marcello Bazzanti · Luciana Mastrantuono	
Vertebrati	99
Marco Seminara	
Aspetti di conservazione e gestione	117
Fabio Stoch · Daria Vagaggini	
Proposte didattiche	139
Marco Seminara	
Bibliografia	147
Glossario	149
Indice delle specie	151



Introduzione

FABIO STOCH · DARIA VAGAGGINI

Sorvolando la nostra penisola, rotondeggianti specchi d'acqua del colore del cielo inevitabilmente attraggono l'attenzione anche del viaggiatore più distratto. Grandi e piccoli bacini dall'apparente quiete, circondati da rive più o meno scoscese, si rivelano all'osservatore più attento, per mostrare però la loro vera natura e tutta la loro complessità solo a coloro che dedicano molto del proprio tempo alla loro conoscenza.

Parliamo dei laghi vulcanici, ambienti unici della nostra penisola che, per la loro antica genesi, hanno visto gli albori dell'umanità, accompagnando da sempre l'uomo nel suo sviluppo socio-culturale in un contesto naturale di elevata bellezza.

I numerosi reperti di insediamenti umani di età neolitica trovati in prossimità delle sponde o sotto le acque dei laghi vulcanici dimostrano quanto fosse stretto il rapporto uomo-lago fin dalla preistoria, proseguito poi nei secoli successivi con gli Etruschi ed i Romani, i primi popoli ad effettuare interventi su questi ambienti a scopo di approvvigionamento idrico. Basti pensare all'Acquedotto di Traiano, detto poi dell'Acqua Paola, che ancor oggi, dopo un millennio, porta le acque del Lago di Bracciano direttamente al Fontanone del Gianicolo a Roma.

Non solo sostentamento per le popolazioni, ma anche curiosità, timore ed ispirazione poetica generavano questi particolari ambienti nell'antichità. Lo dimostrano le parole di Virgilio che, nel VI libro dell'Eneide, racconta di Enea condotto dalla Sibilla Cumana alle porte degli Inferi, situate in prossimità del Lago d'Averno (*facilis descensus Averno: noctes atque dies patet atri ianua Ditis* - facile è la discesa nell'Averno: notte e giorno è aperta la porta dell'oscura Dite).



Lago di Nemi (Lazio)

Lago Albano (Lazio): in evidenza il bordo craterico

Le redini dei nostri avi, con una invisibile linea di continuità con il passato, sono state prese oggi dai ricercatori, che finalizzano i loro studi a migliorare la conoscenza e i meccanismi che regolano questi delicati ecosistemi, o da semplici amanti della Natura che vedono nel lago vulcanico un ambiente da scoprire e rispettare.

Dalle prime ricerche, che risalgono agli ultimi anni del XIX secolo, in cui pionieri della scienza con semplici strumenti, ma tanta volontà ed entusiasmo, affrontavano lunghe camminate per effettuare i rilievi geologici o solcavano le acque con le loro imbarcazioni con l'obiettivo di creare carte batimetriche o prelevare campioni per le analisi chimico-fisiche e biologiche, arriviamo ad oggi con lo stesso entusiasmo di allora, più strumenti e maggiori conoscenze, ma ancora con tanta voglia di capire.

Risultati di anni di ricerche hanno messo in evidenza molti degli elementi che rendono i laghi vulcanici ambienti di inestimabile valore. In primo luogo sicuramente la loro origine, frutto del vulcanismo quaternario, particolarmente attivo in tutta la nostra penisola, che ha generato i crateri e le caldere che ospitano oggi questi bacini. La peculiare morfologia di questi laghi, caratterizzati generalmente da profondità elevate in rapporto alla loro superficie, è derivata proprio dai loro processi di formazione. Dietro la calma apparente delle loro acque si nascondono dunque profondi cambiamenti della crosta terrestre, con un'attività vulcanica in alcuni casi non ancora completamente estinta (permangono infatti fenomeni di vulcanismo secondario, come ad



L'area napoletana in una mappa del 1817-19, prima della bonifica dei laghi nel cratere degli Astroni

esempio fuoriuscite di gas), la stessa che probabilmente generava timori già nell'antichità.

Alla peculiarità geologica, i laghi vulcanici affiancano una natura di pregio, costituita da ricche comunità animali e vegetali che albergano nelle acque o che le utilizzano per il loro sostentamento. Le cinture vegetazionali che circondano le sponde e le macrofite acquatiche sommerse rappresentano il "polmone" di questi ecosistemi, fiancheggiate dalle diversificate microalghe, anello basilare della catena alimentare. Una fauna costituita da specie a vita libera nelle acque o strettamente legate ai fondali si alimenta e ripro-



La folta vegetazione lungo le rive del Lago di Martignano (Lazio)

duce in questi ambienti, rappresentando un serbatoio di biodiversità di inestimabile valore, e la base della catena alimentare ai cui vertici si pongono i pesci e gli uccelli acquatici. Proprio per la ricchezza di questa fauna, la totalità di questi laghi è inserita in aree protette, in Siti di Interesse Comunitario (Direttiva Habitat) o in Zone Speciali di Conservazione (Direttiva Uccelli).

Tutti questi elementi potrebbero far pensare ad un rapporto uomo-natura compatibile con il sostentamento di entrambi. Purtroppo non è così. Tante sono le minacce che incombono sui laghi vulcanici e si pongono come elemento di forte discontinuità con il passato, mettendo fortemente a rischio l'integrità e gli equilibri di questi ecosistemi. La non-sostenibilità di alcune attività antropiche, quali agricoltura intensiva, sovra-pascolamento e turismo, condotte in prossimità di questi bacini, l'introduzione di specie aliene, la modificazione delle linee di costa, rappresentano solo alcuni dei fattori le cui conseguenze sono il peggioramento progressivo della qualità delle acque e il danneggiamento della flora e della fauna a cui si sta assistendo negli ultimi decenni.

Questo nuovo volume dei Quaderni Habitat si pone un duplice obiettivo: da una parte descrivere i laghi vulcanici sotto molteplici punti di vista, partendo dalla loro origine per proseguire con le caratteristiche chimico-fisiche delle acque e le comunità biologiche; dall'altra evidenziare il loro valore per la conservazione della Natura, segnalando le maggiori problematiche che gravitano intorno alla loro gestione. La speranza è che questo testo possa contribuire alla tutela di questi preziosi ambienti, con cui l'uomo per millenni ha convissuto e dei quali ha beneficiato, ma che oggi rischiano un irreversibile deterioramento.



Aspetti geologici

ARNALDO ANGELO DE BENEDETTI · RENATO FUNICIELLO

L'Italia è la regione d'Europa dove si è manifestato in modo più esteso ed intenso il vulcanismo quaternario, nel corso degli ultimi 2 milioni di anni. Si tratta di un fenomeno connesso all'apertura del Mar Tirreno, realizzatasi negli ultimi 10 milioni di anni e si è sviluppato lungo il margine della penisola dalla Toscana alla Campania, sia in ambiente subaereo che in ambiente subacqueo.

L'arco vulcanico peritirrenico, messo in posto nel Pleistocene-Olocene, si estende infatti lungo una stretta fascia per circa 420 km in direzione NW-SE dalla Val d'Era, al Nord (Orciatice e Montecatini, Val di Cecina), fino al Vesuvio, a Sud, con soltanto alcuni centri all'interno (San Venanzo, Cupaello, Pollino) o vicino (Monte Vulture) al fronte delle falde della catena appenninica.

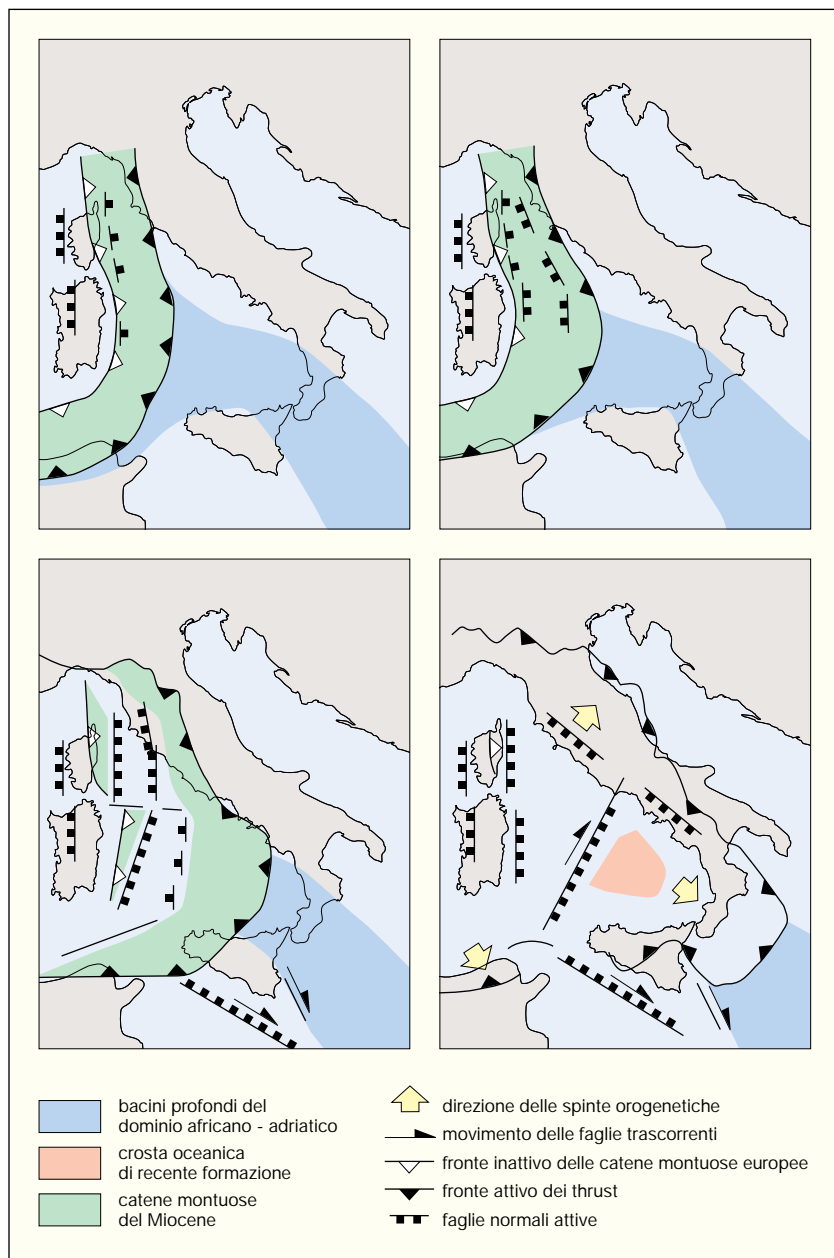
L'arco vulcanico si è sviluppato lungo il margine occidentale del "bacino di retroarco" tirrenico. Nella struttura geofisica della litosfera si individua un assottigliamento crostale e un alto flusso termico con dominio estensivo progressivo all'interno del bacino tirrenico, che nella parte meridionale costituisce uno degli elementi geodinamici più attivi dell'area italiana. Ciò ha determinato l'intrusione subcrostale di un corpo ad affinità sienitica da Larderello all'area romana (Distretto Sabatino), e la risalita di strutture di mantello profondo nel bacino tirrenico meridionale.

La tettonica distensiva si è sviluppata sin dal Miocene medio-superiore essenzialmente attraverso la formazione di faglie normali a direzione NW-SE ed immersione in direzione NE e faglie trascorrenti ad esse perpendicolari (NE-SW) che hanno smembrato la catena appenninica, formando bacini sedimentari riempiti sia da depositi di sabbie e argille spesse fino a circa 1000 m, sia da depositi di ambiente di transizione a bacini di mare meno profondo, prima dell'inizio del vulcanismo subaereo. I vulcani sono direttamente connessi a questo sistema di faglie che ha generato edifici vulcano-tettonici



Le rocce eruttive affiorano costituendo l'isola Martana al centro del Lago di Bolsena (Lazio)

Veduta aerea del Distretto vulcanico Sabatino: a sinistra la riva orientale del Lago di Bracciano, a destra il Lago di Martignano e in alto il cratere che ospitava il Lago di Stracciaccappa



Schema semplificato relativo all'apertura del Tirreno e alla migrazione del fronte della catena appenninica

come le caldere dei Colli Albani o dei Campi Flegrei o grandi sistemi di dicchi come appaiono nell'edificio vulcanico del Somma-Vesuvio.

Dati geologici e geofisici integrati mostrano che al di sotto dell'arco vulcanico e dei depositi clastici post-orogenici la successione carbonatica mesozoica-cenozoica (il Mesozoico si estende temporalmente nell'intervallo che va da circa 248 a 65 milioni di anni fa, il Cenozoico da questa data in poi) è assottigliata, accavallata ed estesa lateralmente lungo un livello di scollamento sul basamento cristallino, ubicato approssimativamente a 7-8 km di profondità.

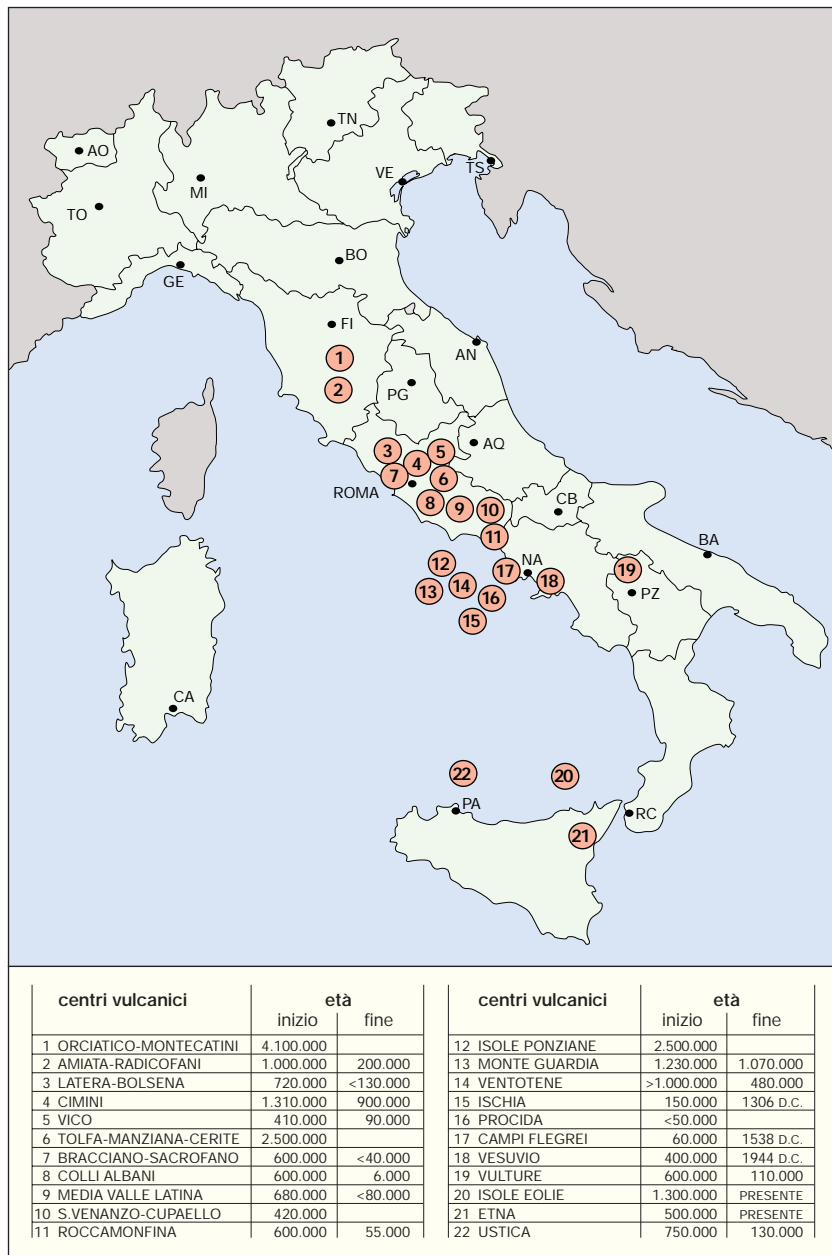
In base alla distribuzione spazio-temporale ed a criteri petrografici è possibile dividere la catena appenninica in tre province petrografiche: la Provincia Magmatica Toscana, la Provincia Magmatica Romana e la Provincia Magmatica Lucana di recente identificazione. All'interno di ciascuna di queste regioni magmatiche, rocce ignee a differente affinità petrochimica sono state eruttate all'interno delle principali associazioni magmatiche.

Dal punto di vista morfologico il vulcanismo ha determinato la formazione di: strutture calderiche come quelle di Bolsena-Laterra, di Bracciano-Sacrofano, del Vulcano Laziale (Colli Albani), dei Campi Flegrei; oppure stratovulcani come Vico, le Faete, Roccamonfina, Ventotene, Ischia, Procida, il Somma-Vesuvio, il Vulture; o ancora, complessi di domi vulcanici come il Monte Amiata, i centri di Tolfa, dei Ceriti-Manziate, dei Monti Cimini, delle isole Ponziane; oppure, infine, campi vulcanici monogenetici come nel Distretto Umbro, nei Monti Ernici o a Ponza.

Molte delle forme vulcaniche sono ancora ben conservate, tra cui coni, crateri e caldere, oltre a colate e campi lavici. Proprio crateri e caldere sono i luoghi adatti al raccoglimento delle acque sia di origine meteorica che di origine idrotermale. Ciò è dovuto tanto alle morfologie a bordi rialzati, sia dei crateri vulcanici che delle caldere, quanto alla natura stessa dei prodotti vulcanici che spesso sono caratterizzati da bassa permeabilità dando luogo, quindi, a livelli pressoché impermeabili atti ad evitare il deflusso delle acque in profondità. La formazione di un lago è quindi il prodotto di molteplici fattori, tra i quali determinante è soprattutto l'assetto strutturale ed i suoi rapporti con la falda freatica superficiale: crateri e caldere sono come dei grandi pozzi naturali alimentati da queste acque.



Livelli vulcanici nel Vulture (Basilicata)



Età di inizio e intervallo di attività dei principali centri vulcanici italiani

I laghi vulcanici possono essere distinti, a seconda della loro origine, in primari e secondari. Sono da considerare come laghi vulcanici primari gli accumuli di acque ospitati direttamente dalle morfologie vulcaniche (laghi in caldere o depressioni vulcano-tettoniche e laghi craterici), trattati nel presente volume. Sono laghi vulcanici secondari tutti i bacini lacustri la cui origine è stata causata, almeno in parte, dal vulcanismo, ma che si sono sviluppati in litologie non di origine vulcanica (come i laghi da sinkhole, peculiare tipologie lacustri cui è dedicata la scheda a pag 16). Infine vanno ricordati i laghi pseudovulcanici, dovuti alla fuoriuscita di acque termali e minerali; in Italia se ne annoverano pochi casi (come il Bagno dell'Acqua, nell'Isola di Pantelleria, e il Lago di Arquà, nei Colli Euganei).



Bagno dell'Acqua (Pantelleria, Sicilia)



Lago di Arquà (Colli Euganei, Veneto)

■ Laghi calderici o da depressioni vulcano-tettoniche

Alcuni vulcani italiani sono caratterizzati dalla presenza di caldere o depressioni vulcano-tettoniche, termini un tempo distinti, ma oggi considerati sinonimi. Si tratta di vaste aree depresse all'interno di un vulcano originate dalla venuta a giorno di cospicue quantità di magma e dallo svuotamento parziale della camera magmatica e dal conseguente ribassamento di ampi settori del vulcano, a causa delle mutate condizioni meccaniche in profondità. Tra i grandi laghi vulcanici italiani quelli di Bolsena, Vico e Bracciano appartengono a questa categoria.

Lago di Bolsena. Noto con il nome latino di *Lacus Volsiniensis*, è il più grande lago vulcanico italiano (114 km²) e raggiunge una profondità di 151 m. È ubicato nell'alto Lazio, in provincia di Viterbo, ed è caratterizzato dalla presenza di due isole, la Bisentina (0,17 km²) e la Martana (0,10 km²). La sua origine è legata ai grandi volumi di magma emessi durante le prime fasi della storia del Distretto Vulcanico Vulsino (576-500.000 anni fa) che, secondo i modelli più accreditati, determinarono le condizioni per il crollo del tetto della camera magmatica parzialmente svuotata e il ribassamento della zona ad essa soprastante. La distribuzione delle alternanze di depositi vulcanici e lacustri indica

Una categoria di laghi legati in qualche modo all'attività vulcanica è quella dei laghi da sinkhole, termine inglese (sink=affondare e hole=buco) che indica degli sprofondamenti (normalmente circolari e del diametro variabile da qualche al centinaio di metri) provocati dalla formazione a debole profondità di cavità. Molto spesso, grazie alla peculiare conformazione, le aree interessate dai sinkhole divengono sede di pozze d'acqua o piccoli laghetti. Le cavità all'origine della formazione dei sinkhole possono essere prodotte dalla migrazione di sedimenti a bassa coesività sul fondo di cavità paleocarsiche. Una seconda modalità di formazione è dovuta alla dissoluzione chimica, profondamente connessa all'attività vulcanica poiché i fluidi aggressivi responsabili del fenomeno sono in questo caso ricchi in anidride carbonica (CO_2) e di acido solfidrico (H_2S).

Gli effetti della dissoluzione sono particolarmente evidenti sulle rocce carbonatiche, molto diffuse nella nostra penisola, ove danno origine alla formazione di cavità carsiche.

Tra i numerosi corpi d'acqua originatisi in questo modo meritano di essere menzionati quelli situati presso Roma (Lago Puzzo, o Lago di Leprignano, Lago Nuovo, Lago di Giulianello), nella Piana di S. Vittorino presso Rieti (tra cui il più noto è il Lago di Paterno), ai piedi dei Monti Lepini (Laghetti del Vescovo) e presso Caserta (Lago di Vairano, Lago di Corree).

Infine, nella zona delle Acque Albule (Bagni di Tivoli, Roma) è situato un campo di doline, alcune delle quali trasformate in laghetti; tra quelli ancora attivi ricordiamo il Lago di S. Giovanni, i Laghetti della Regina e delle Colonnelle (sorgenti delle acque sulfuree dette "Albule" per il loro colore biancastro, lattiginoso).



Laghetti del Vescovo ai piedi dei Monti Lepini (Lazio)

come il lago abbia subito, nel corso della sua storia, profonde modificazioni legate alla complessa evoluzione del Distretto Vulsino. Le prime grandi eruzioni sono caratterizzate dall'emissione di non meno di 50 km^3 di magma; per termine di confronto, si pensi che i prodotti della famosa catastrofica eruzione del Vesuvio del 79 d.C., quella che distrusse Pompei, sono valutati essere soltanto circa 1 km^3 . Si verificò



Lago di Bolsena (Lazio)

successivamente una fase di intensa deposizione di scorie da attività di fontana di lava nella zona circumcalderica settentrionale (360-352.000 anni fa), cui seguirono alternanze di depositi ignimbrici, lave e depositi lacustri. Recenti scoperte archeologiche subacquee di insediamenti dell'Età del Bronzo hanno indicato che il livello del lago è rimasto per lungo tempo invariato a 294 m s.l.m. Durante l'Età del Ferro, circa tremila anni fa, vi fu una rapida elevazione, per motivi non ancora accertati, fino al massimo livello consentito dal punto naturale di tracimazione (incile) che si trovava a 306 m s.l.m. In seguito gli etruschi, per recuperare spazi agricoli, ridussero il livello a 303 m tagliando uno sperone di roccia che sbarrava il percorso del fiume Marta, in località tuttora chiamata "Sasso Tagliato". Il livello attuale del lago è determinato dall'incile in muratura e dalle paratoie di regolazione che sono state poste in epoca medioevale a circa 303,5 m s.l.m. nel porto di Marta, all'origine dell'omonimo emissario.

Lago di Vico. Il Lago di Vico, o *Lacus Ciminus*, vanta il primato di altitudine tra i grandi laghi italiani con i suoi 510 m s.l.m. Secondo la leggenda ebbe origine dalla clava che Ercole infisse nel terreno per sfidare gli abitanti del luogo; nessuno riuscì a rimuoverla. Quando lo fece Ercole, sgorgò un fiume d'acqua che andò a riempire la valle formando così il lago. Il Lago di Vico è in realtà il prodotto del riempimento dell'area calderica, soggetta a vari e ripetuti sprofondamenti successivi alla messa in posto delle grandi ignimbriti tra cui il Tufo Rosso a Scorie Nere. Al termine dell'attività eruttiva dell'intero apparato vulcanico (datata a circa 80.000 anni fa), le acque di falda e le acque meteoriche portarono alla graduale sommersione della caldera di Vico. Il lago è circondato dal complesso montuoso dei Monti Cimini, in particolare è cinto dal Monte Fogliano (965 m) e dal Monte Venere (851 m). All'inizio, e per molti millenni successivi, come evidenziato dalla presenza di sedimenti lacustri nell'area perilacuale, il lago aveva un'estensione assai maggiore, con il livello delle acque che arrivava infatti fino quasi ai bordi della caldera e con la cima del Monte Venere che

era una penisola nella parte nord orientale della distesa lacustre. Non è chiaro se furono gli Etruschi o i Romani a modificarne l'aspetto abbassando il livello delle acque di circa 20 m attraverso un canale artificiale sotterraneo; certo è che l'opera è antecedente alla costruzione della Cassia Cimina, nel periodo imperiale. I Farnese, intorno al 1500, ripristinarono il canale, l'attuale rio Vicano, abbassando il livello del lago di altri 3 m e regolandone le escursioni con una chiusa tuttora esistente. L'abbassamento del livello delle acque lasciò scoperta una notevole estensione di terreni coltivabili, favorendo l'insediamento di piccole comunità di agricoltori e pastori. Oggi il lago si estende per una superficie di circa 12 km² ed ha una profondità massima di 49,5 m.

Lago di Bracciano. È situato all'interno della caldera del Distretto Vulcanico Sabatino, in Provincia di Roma, nel Lazio centro-settentrionale. Secondo nel Lazio ed ottavo in Italia per superficie (57 km²), il romano *Lacus Sabatinus* ha una profondità massima di 165 m ed un volume di oltre 5 miliardi di m³. La sua forma è pressoché circolare e i tre centri abitati principali di Bracciano, Anguillara e Trevignano si collocano a distanze reciproche regolari lungo il perimetro. Circa 800.000 anni fa una serie di eruzioni vulcaniche comportò l'emersione del sistema vulcanico Sabatino; cessate le eruzioni i crateri si riempiono d'acqua formando nel tempo bacini lacustri fra cui il più importante tra quelli tuttora esistenti è certamente quello di Bracciano. La vasta depressione del lago si è formata in parte per l'azione di faglie regionali ed in parte perché la vasta

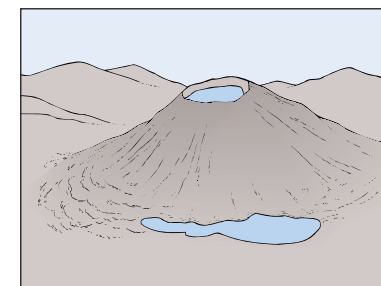


Lago di Bracciano (Lazio)

camera magmatica, che doveva trovarsi a pochi km dalla superficie e che alimentò tutti i crateri del distretto, nel suo progressivo svuotarsi, favorì il graduale crollo del tetto lungo fratture di distensione che alimentarono anche potenti colate di lava. Così, in fasi successive, tutta l'area oggi occupata dal bacino lacustre diventò un'ampia caldera. Essa si è formata in un arco di tempo compreso tra 400.000 e meno di 150.000 anni fa. Unico suo emissario naturale è il torrente Arrone che, sbarrato da una diga, viene utilizzato solo in caso di piena, mentre di norma le acque scaricano nel bacino del Tevere. L'acqua del lago a partire dall'età romana fu utilizzata per consumo potabile; l'antico acquedotto di Traiano fu restaurato da Paolo V agli inizi del '600 e perciò chiamato "Acqua Paola", acqua oligominerale nota per essere estremamente leggera, il cui fontanone terminale decora la panoramica piazza in cima al colle del Gianicolo a Roma.

■ Laghi craterici

I crateri vulcanici hanno la forma ideale per la raccolta delle acque meteoriche. Quando a tali forme si accompagnano nei depositi i requisiti di impermeabilità necessari ad evitare che le acque si infiltrino in profondità, si forma un lago craterico. Tra i laghi craterici i più comuni sono i laghi impostati sui crateri dei "maar" che sono generati da esplosioni freatiche e freatomagmatiche legate, cioè, all'interazione tra la



Due tipologie di laghi vulcanici: un lago di caldera, all'interno della conca precedentemente occupata dal cratere del vulcano, ed uno di sbarramento, ai piedi dell'apparato vulcanico

falda acquifera superficiale ed il magma in risalita. Il termine "maar" in tedesco significa "mare" e prende origine nella zona dell'Eifel, nella Germania settentrionale, caratterizzata dalla presenza di molti laghi che hanno questa origine. Come accennato, le esplosioni derivano dalla venuta a contatto del magma con l'acqua di falda. L'energia derivante dal repentino passaggio di stato dell'acqua da liquido a vapore, con aumento di volume di circa 100 volte, è il motore che genera l'esplosione e la rapida risalita del magma che viene frammentato in minutissimi elementi, della granulometria della cenere. L'acqua di cui sono ricchi i serbatoi calcarei che costituiscono la Dorsale Appenninica è la riserva ideale per interagire col magma e determinare eruzioni di questo tipo. L'interazione può avvenire a diverse profondità, ed in zone paludose od occupate da estesi specchi lacustri anche di bassa profondità si può avere il contributo delle stesse acque superficiali. È anche l'acqua stessa di un lago che sembra possa determinare le condizioni per l'innescarsi di un'esplosione.



Lago di Mezzano (Lazio)



Lago di Nemi (Lazio)

Questa ipotesi sembra, però, in contraddizione con l'evidenza che la maggior parte dei centri vulcanici di questo tipo sono caratterizzati da una sola fase esplosiva ed i crateri da essa formati sono detti, quindi, monogenici. Esistono, tuttavia, alcuni maar dove più eruzioni si ripetono nel tempo (poligenici), per i quali i modelli secondo cui le acque del lago craterico svolgono un ruolo attivo sono da tenere in

attenta considerazione. Per questo motivo il livello dei laghi craterici è tenuto sotto attento controllo, come anche le caratteristiche fisiche e chimiche delle acque. Morfologicamente, i maar sono caratterizzati da una tipica forma svasata, ad imbuto, derivante dalla distruzione, a causa dell'esplosione, delle formazioni rocciose preesistenti, il più delle volte costituite da altri depositi vulcanici derivanti dall'attività precedente del vulcano.

I maar sono considerati tra gli oggetti vulcanici che vanno tenuti in debito conto per la valutazione del rischio vulcanico. Ciò è intrinsecamente legato alla loro natura e alle modalità della loro genesi. La particolare morfologia dei crateri da maar li predispone a possibili crolli e frane. Le esplosioni freatomagmatiche che presiedono alla loro genesi, inoltre, creano un condotto che, sebbene riempito di vari depositi, mette in comunicazione parti profonde della zona subvulcanica con la superficie che i gas possono utilizzare come via preferenziale di accumulo e flusso: i principali fattori di rischio sono legati al flusso di anidride carbonica; il suo possibile accumulo nelle profondità dei laghi da maar crea le condizioni per improvvise eruzioni di gas come il recente caso del Lago Nyos in Camerun (1984) o fenomeni di rovesciamento delle acque del lago, con possibile esondazione delle stesse. Per tali motivi nei laghi da maar l'azione dell'uomo deve assolutamente concentrarsi in una efficace azione di monitoraggio sismico, del flusso di gas e della generale stabilità dei versanti.

In Italia, appartengono a questa categoria i laghi di Mezzano nei Vulsini, Martignano e Monterosi nei Sabatini, Albano e Nemi nei Colli Albani, quelli di Monticchio nel Vulture e il Lago d'Averno nei Campi Flegrei.

Lago di Mezzano. Noto anche come *Lacus Statoniensis*, è situato all'interno della Caldera di Latera, a sua volta risultante dalla sovrapposizione di diverse caldere. È impostato all'interno di un cratere formatosi sul bordo della caldera del Vepe, che è la più recente tra le caldere monogeniche di Latera. Il cratere è un maar la cui formazione è associata all'ultima attività esplosiva all'interno

Le aree vulcaniche occupate dai laghi, se bonificate, offrono terreni fertili, in particolare per l'abbondanza di minerali sia nei terreni sia nei limi lacustri. Molti bacini lacustri vulcanici sono stati pertanto bonificati ad opera dell'uomo.

Nei Vulsini le località di Lagaccione, Latera e Montefiascone ospitavano dei laghi. Tra il '600 e il '700 fu avviata nei Sabatini la bonifica dei laghi paludosi di Stracciaccappa (noto in tempi passati col nome di Lago di Straccio) e Baccano, che si realizzò nel 1828, quando la Presidenza delle Acque e delle Strade, per sopperire alla deficienza di acque dell'Acquedotto Paolo, aprì un traforo che mise in comunicazione i laghi di Martignano, Bracciano, Stracciaccappa e Baccano.

Il Brocchi nel suo "Viaggio nel Lazio: la Tuscia e l'agro pontino" del 1815-1818 riferisce come "L'osteria di Baccano è situato in un baccino circondato tutto all'intorno da eminenze, il quale una

volta era un lago, e forse anticamente un cratere. A ricordo d'uomini era in parte invaso dall'acqua alla quale fu dato esito mediante il taglio di un emissario che porta fuori le acque [...] e che prima di questa operazione stagnavano in quel sito".

Altri laghi "fossili" sono il Lago di Cese, il Lago Morto, i laghi di Riano e Polline. Nei Colli Albani esistevano i laghi di Ariccia, Castiglione, Gabii, Laghetto a Pavona, Prata Porci, S. Giuliano, Valle Marciana e il Lago Regillo, prosciugato nel XVII secolo (oggi la piana che lo ha sostituito ha il nome di "Pantano secco"). Nei Campi Flegrei, in Campania, il Lago di Agnano è stato bonificato nel 1870, mentre sono rimaste ben 75 sorgenti con temperature fino a 75°C. A Nord-Ovest del lago, presso il centro di Astroni, sono riportati in carte storiche il Lago Grande, Cofaniello Piccolo o Lago di Mezzo e Cofaniello Grande, che sono attualmente assai ridotti.



L'area originariamente occupata dal Lago di Ariccia (Lazio)

della caldera, circa 160.000 anni fa. I prodotti emessi sono quasi esclusivamente costituiti da ceneri fini e blocchi di ricaduta balistica, e si sono accumulati intorno alla depressione craterica costituendone i margini. Mentre il margine interno è molto ripido, quasi verticale, quello esterno è molto più dolce, con un angolo che raramente supera i 10-15°C. Il lago (superficie 0,5 km², profondità massima 31 m) ha un emissario (il fosso Olpeta) che attraversa la caldera per poi confluire nel fiume Fiora.



Lago di Martignano (Lazio)

Lago di Martignano. Situato ad Est del Lago di Bracciano a quota 207 m s.l.m., è noto con l'antico nome di *Lacus Alsietinus*, ha una superficie di 2,4 km² ed è, in proporzione, molto profondo, con i suoi 60 m. L'acquedotto Alsietinus, costruito nel 2 a.C. per sfruttare le acque del lago altrimenti privo di emissari naturali, alimentava la Naumachia di Augusto, ai piedi del Gianicolo, i Giardini di Cesare oltre a fattorie private e alla stessa fontana del Gianicolo. Il cratere che ospita il lago si è formato a seguito di almeno 3 eruzioni freatomagmatiche (tante sono, infatti, le unità eruttive sovrapposte e separate da paleosuoli o superfici erosive a testimonianza di periodi di stasi dell'attività vulcanica) ed è considerato, allo stato attuale delle conoscenze, l'ultimo centro attivo del Distretto Vulcanico Sabatino. Esplorazioni subacquee all'interno del lago hanno evidenziato come l'area sia stata abitata dall'uomo fin dal Neolitico. Una struttura lignea e tracce di fuochi a 32 m dall'attuale livello del lago indicano tale quota come l'antica riva, mentre grandi querce fossili testimoniano cospicue variazioni del livello del lago avvenute in tempi storici.

Lago di Monterosi. Situato nel distretto vulcanico Sabatino a 276 m s.l.m. e anticamente conosciuto come *Lacus Janulae*, ha una superficie di 0,3 km² e un diametro di 600 m, con una profondità di soli 7 m. È noto storicamente anche per l'incontro, nel lontano 1155, tra Papa Adriano IV e Federico Barbarossa che, rifiutandosi di reggere la staffa al cavallo del Papa, causò un clamoroso incidente diplomatico. Si è formato a seguito di una singola eruzione freatomagmatica di media intensità.

Lago Albano. Il Lago Albano (*Lacus Albanus*) è situato nei Colli Albani a circa 15 km dalla città di Roma, a quota 293 m s.l.m. ed ha una superficie di 6 km². È il più profondo lago craterico d'Italia (-165 m). Si tratta di un maar poligenico, generato, cioè, da più di una fase esplosiva. La stratigrafia del centro vulcanico d'Albano, studiata nel dettaglio anche per la componente di rischio per la città di Roma, ha evidenziato, infatti, che almeno sette eruzioni a carattere esplosivo si sono succedute in un intervallo di tempo che va da circa 70.000 anni fa a circa 29.000 anni fa. L'età esatta dell'ultimo episodio eruttivo si deve, tuttavia, ancora determinare. È il più importante e il più recente centro vulcanico del vulcano dei Colli Albani (o Vulcano Laziale) ed appartiene, morfologicamente, al "Litosoma di Via dei Laghi", ossia l'edificio vulcanico costruito durante l'ultima fase freatomagmatica del vulcano. Fu luogo di antichi insediamenti umani che, quasi certamente a seguito dell'attività del vulcano, si spostarono ripetutamente a varie quote nel bordo interno del cratere seguendo le oscillazioni del livello del lago. Nel 394 a.C. fu costruito dai Romani un tunnel drenante lungo circa 1200 m con doppia funzione di approvvigionamento idrico dell'area attraversata dalla galleria, tramite pozzi, e di regolazione delle stesse acque ad una quota di circa 70 m dal punto più basso del bordo craterico. Recenti studi hanno evidenziato come, nel corso della sua storia, il lago esondò più volte prevalentemente in direzione di Roma, generando distruzione negli insediamenti umani e nelle attività ad essi correlate durante tutto il Bronzo Medio (1700-1350 a.C.). Questa opera idrau-



Lago Albano (Lazio)

lica di tipo moderno può essere considerata la prima azione dell'uomo, a livello mondiale, di mitigazione del rischio vulcanico. Dal punto di vista geologico le successioni vulcaniche che si osservano nel bordo interno del cratere sono costituite da una prima sequenza basale di prodotti dell'attività del Vulcano laziale precedente le esplosioni del maar, che nell'area craterica sono stati completamente asportati, cui si sovrappongono i depositi stratificati delle sette eruzioni, alternati a paleosuoli generati durante le fasi di inattività. Attualmente il livello del lago è ad una quota di alcuni metri inferiore alla quota di sfioro del tunnel drenante. Il lago è comunque oggetto di attenti controlli sia del livello stesso che delle caratteristiche chimiche e fisiche delle acque, in quanto il significativo flusso di CO₂ (anidride carbonica) di origine profonda che interessa l'area rappresenta un motivo di preoccupazione per tutta la zona intensamente urbanizzata, poichè un suo eventuale accumulo nel fondo del lago potrebbe determinare le condizioni per una improvvisa risalita del livello delle acque.

Lago di Nemi. Il secondo e più vasto lago dei Colli Albani, con una superficie di 1,6 km², ma poco profondo (34 m), il Lago di Nemi o *Lacus Nemoensis* (quota 316 m s.l.m.) fu generato da eruzioni esplosive da collocarsi circa 150.000 anni fa. La depressione che ospita il lago è costituita da depositi di più eruzioni freatomagmatiche che originarono dallo stesso cratere. Il bordo craterico è caratterizzato dalla sovrapposizione, ai depositi dell'attività vulca-



Lago di Nemi (Lazio)

nica precedente, dei due antichi crateri che gli conferiscono una forma ovale orientata in senso meridiano. Lungo le sponde del lago sono state trovate alcune cuspidi, segno che quelle zone erano anticamente frequentate dall'uomo di Neanderthal, e sono tornate alla luce alcune tombe dell'Età del Ferro. Negli anni '30 il lago venne abbassato di 22 m per riportare alla luce due antiche navi romane del I secolo, esposte dopo alcuni restauri lungo le sponde del lago. Nel 1945 le navi vennero distrutte quasi completamente da un incendio; alcuni resti, accanto a due ricostruzioni in scala delle navi, sono attualmente conservati presso il Museo del Lago. La bassa profondità del lago, soprattutto confrontata col vicino Lago Albano, può imputarsi sia all'età antica di cessazione della sua attività e quindi al lento riempimento di sedimenti del bacino lacustre, sia alla relativa debolezza delle sue eruzioni i cui depositi, non possedendo l'energia sufficiente, sono quasi integralmente rimasti confinati nell'area craterica riducendone il volume. Il lago ha un emissario, opera probabilmente dell'antica popolazione degli Aricini, costituito da un tunnel di 1653 m di lunghezza per un dislivello totale di circa 12,5 m che fu restaurato nel 1927-28 durante i mastodontici lavori di svuotamento parziale del lago.

Laghi di Monticchio. I due piccoli laghi di Monticchio (quota 600 m s.l.m.), noti anche come "i gemelli del Vulture", occupano il doppio cratere centrale dell'apparato vulcanico del Vulture sulle sue pendici occidentali, a poca



Lago Piccolo di Monticchio (Basilicata) con la Badia di San Michele

distanza dai centri di Rionero e Melfi (Basilicata). Il Lago Grande (con una superficie di 0,4 km² e una profondità massima 38 m) e il Lago Piccolo (con una superficie di 0,1 km² e una profondità massima 35 m) sono separati da una striscia di terra larga 216 m, e si formarono circa 110.000 anni fa. L'intero complesso vulcanico del Vulture si formò in un intervallo di tempo che va da circa 600.000 a 130.000 anni fa ed è ancora oggi sede di attività sismica e di un forte flusso di CO₂, ad indicare un'attività non ancora del tutto estinta. I depositi correlati alla formazione dei laghetti sono costituiti da un'unità piroclastica di granulometria lapillosa, a composizione melilitica, stratificata con strutture dunari (Case Agostinelli), di spessore massimo di circa 4 m, affiorante su un areale con asse di dispersione verso Ovest. La mancanza dello stesso deposito nella porzione orientale della depressione che ospita il lago indica che l'eruzione non ebbe l'energia sufficiente a superare i 500 m circa che ci sono tra il bordo craterico e il fondo del lago.

Lago di Averno. È posto all'interno del complesso dei Campi Flegrei, tra il Monte Nuovo ed il Monte Grillo. Di forma ellittica, con una profondità massima di 35 m, il Lago d'Averno giace all'interno di un vulcano spento nato circa 4.000 anni fa. Il lago subì una profonda modifica ad opera di Marco Agrippa, che nel 38-36 a.C., per esigenze militari, diede avvio alla costruzione del *Portus Julius*. La sua morfologia fu sconvolta dalla recente eruzione del 1538 nota col nome di eruzione del Monte Nuovo. Il nome Averno deriva dal greco *Aor-non*, ossia luogo senza uccelli. Era credenza che tale assenza fosse dovuta al fatto che le acque del lago esalavano dei particolari gas che non permettevano la vita agli uccelli. Nella storia il Lago d'Averno è la località flegrea maggiormente evocata da Omero, Virgilio e il culto dell'oltretomba, perché ritenuta l'ingresso dell'Ade. Considerato fin dall'antichità sede dei Giganti, fu identificato con la dimora degli Inferi e del popolo dei Cimmerii, abitanti delle caverne, che fuggivano la luce del sole. Furono i Greci a voler riconoscere in questo luogo le descrizioni omeriche legate agli episodi di Odisseo. Si riteneva inoltre che il lago non avesse fondo.



Lago di Averno (Campania)

Idrochimica

SILVIA ARISCI · LAURA LEPORE · MICELA ROGORA

Da un punto di vista strettamente idrologico, i laghi sono masse d'acque raccolte in depressioni della superficie terrestre non alimentate dal mare. La parte di territorio che circonda il lago, e che grazie alla sua pendenza fa da imbuto di raccolta delle acque piovane, è il suo bacino imbrifero (o idrografico). Lo spartiacque è la linea più alta del bacino imbrifero, per cui le acque che cadono oltre lo spartiacque non vengono convogliate al lago.

Il bacino imbrifero influisce enormemente sugli ecosistemi acquatici: la sua superficie determina il volume delle acque raccolte, la sua composizione mineralogica influenza il chimismo di base dei laghi, la sua copertura vegetale influisce nella ripartizione delle acque di ruscellamento e di evapotraspirazione. Le acque drenate si caricano poi di sostanze organiche e inorganiche, ma anche di inquinanti in funzione dell'uso prevalente (agricolo, industriale, urbano) del territorio attraversato.

Oltre alle acque che giungono al lago dalla superficie del bacino, ci sono poi altre sorgenti sotterranee rappresentate dalle acque di falda e, nel caso dei laghi vulcanici, da infiltrazioni di acque profonde originate dall'apparato vulcanico e caratterizzate da un chimismo molto particolare; il lago può in questo caso rappresentare la parte affiorante di un acquifero di dimensioni superiori.

L'ubicazione geografica determina in buona parte il comportamento fisico dei laghi: quelli del Nord Europa durante l'inverno sono ghiacciati in superficie e non possono, in quel periodo, scambiare ossigeno con l'aria; quelli tropicali e nella fascia temperata hanno uno strato superficiale più caldo che, galleggiando sugli strati più profondi, ostacola il rimescolamento delle acque



Lago di Bracciano (Lazio)



Lago di Vico (Lazio)

L'acqua è l'essenza della vita sulla terra ed è alla base della composizione chimica di ogni essere vivente. Essa regola anche il metabolismo di un lago, con le sue particolari proprietà di densità, di alta capacità termica e di comportamento nei diversi stati di aggregazione (liquido, solido e gassoso).

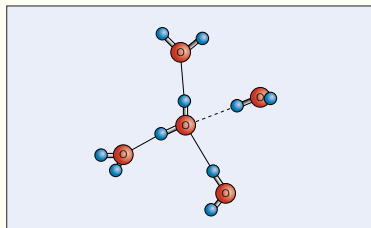
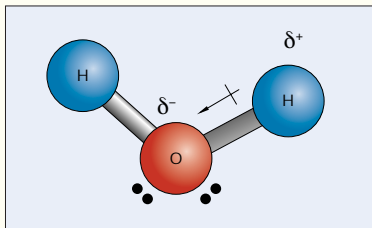
La ragione delle proprietà uniche dell'acqua è da ricercare principalmente nella sua struttura molecolare con due legami fortemente polarizzati a causa della differente elettronegatività dei due atomi impegnati nel legame, che vedono rispettivamente una parziale carica negativa sull'ossigeno (δ^-) e due parziali cariche positive sui nuclei d'idrogeno (δ^+). La polarizzazione del legame porta alla formazione di un dipolo elettrico che genera interazioni intermolecolari (cioè tra molecole adiacenti). L'interazione nella molecola d'acqua è detta legame ad idrogeno.

Nello stato solido (ghiaccio) le molecole si orientano in maniera ordinata a formare una struttura tetraedrica in cui una molecola centrale si coordina, mediante legami ad idrogeno, ad altre quattro. La particolarità del ghiaccio è che la distanza intermolecolare è maggiore che nello stato liquido, il che comporta che la densità della fase solida sia minore di quella della fase liquida. Il massimo di densità (1 g/ml) si raggiunge a 3,98°C, alla pressione di 1 atm. Al di sotto di questa temperatura la densità torna a diminuire fino a quando vie-

ne raggiunto il punto di congelamento a 0°C. La conseguenza più importante di questo fenomeno è che il ghiaccio galleggia sull'acqua e che, in un lago ghiacciato in superficie, la temperatura del corpo d'acqua sottostante si mantiene pressoché costante, per effetto della bassa conducibilità termica del ghiaccio stesso che ne riduce le perdite di calore verso l'atmosfera.

La densità dell'acqua varia, oltre che con la temperatura, anche con la pressione ed il contenuto salino; infatti cresce con l'aumento della pressione (in un corpo idrico l'incremento è di 1 atm ogni 10 m di profondità) e con l'aumento del peso specifico delle sostanze disciolte. I legami ad idrogeno, che s'instaurano tra le molecole, sono responsabili anche dell'elevato calore specifico dell'acqua, ossia la quantità di calore da fornire ad un grammo di acqua affinché la sua temperatura aumenti di 1°C. L'elevata capacità termica dell'acqua spiega perché vicino ad un lago di cospicue dimensioni non si verificano forti escursioni termiche e perché corpi idrici estesi siano in grado di cedere all'atmosfera elevate quantità di calore accumulate durante i periodi caldi.

Le forti interazioni intermolecolari presenti nell'acqua ne influenzano anche la viscosità, ovvero la resistenza che il mezzo oppone ai moti al suo interno, che risulta essere particolarmente elevata (775 volte quella dell'aria).



La molecola dell'acqua e la sua struttura tetraedrica allo stato solido (ghiaccio)

e l'ossigenazione al fondo. Nei laghi alpini i livelli d'acqua più alti si verificano nella tarda primavera o in estate, quando si sciolgono le nevi; nell'Italia centrale invece si verificano in inverno, quando abbonda la pioggia. La media delle precipitazioni che cadono annualmente sull'Italia è di circa un metro e l'evaporazione mostra valori analoghi. Ciò significa che le piogge che cadono direttamente sui nostri specchi lacustri ripristinano, mediamente, solo le perdite per evaporazione. L'acqua in eccesso, quella che defluisce dall'emissario, equivale grosso modo all'apporto proveniente dal bacino, per cui i laghi alimentati da estesi bacini, come quelli alpini, hanno emissari di grande portata, mentre i laghi alimentati da piccoli bacini, come sono quelli di origine vulcanica, hanno emissari con portate esigue.

Il tempo teorico di ricambio (TR) rappresenta il rapporto tra il volume del lago e la massa d'acqua che defluisce attraverso l'emissario in un anno. Il tempo di ricambio è un indice della capacità del lago di smaltire attraverso l'emissario parte degli inquinanti che giungono dal bacino.

Nella tabella le principali caratteristiche morfometriche ed idrologiche dei maggiori laghi italiani (Garda, Iseo, Como, Maggiore), sono messe a confronto con quelle di alcuni laghi vulcanici.

LAGO	BACINO km ²	VOLUME m ³	PROFONDITÀ m	SUPERFICIE km ²	PORTATA EMIS. m ³ /sec	TEMPO RIC. anni
Garda	2350	50,35	346	370	59,5	27
Iseo	1842	7,60	251	62	59,4	4
Como	4572	22,50	410	146	158,0	4
Maggiore	6559	37,50	370	212	297,0	4
Albano	10	0,46	165	6	-	47
Nemi	11	0,03	34	1,6	-	15
Trasimeno	376	0,59	6	124	0,9	21
Bolsena	273	9,20	151	114	2,4	120
Vico	41	0,26	49,5	12	0,5	17
Bracciano	147	5,05	165	57	1,2	137
Monticchio (Gr.)	4	0,004	38	0,4	-	110

Principali caratteristiche dei maggiori laghi subalpini e di alcuni laghi vulcanici dell'Italia Centrale

Rispetto ai laghi subalpini, i laghi vulcanici presentano tempi di ricambio assai più elevati e ciò è dovuto generalmente ad una vivacità idrologica alquanto modesta da mettere in relazione alla genesi stessa di questi bacini. I laghi di Bolsena, Vico e Bracciano ad esempio, occupano la sommità di altrettanti edifici vulcanici, per cui il loro areale contribuyente rappresenta una superficie molto limitata, soprattutto se confrontata con il volume delle acque lacustri raccolte nelle relative cuvette.

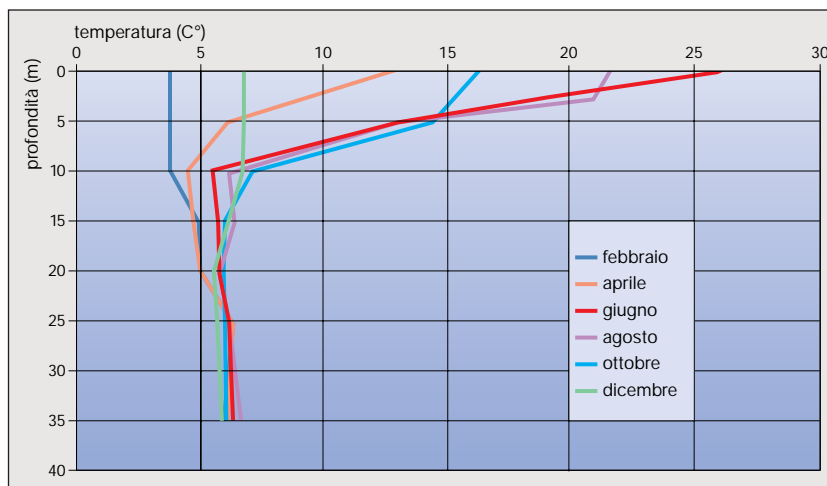
■ Temperatura e ossigenazione delle acque lacustri

Dal punto di vista termico, i laghi vulcanici dell'Italia Centrale appartengono alla categoria dei laghi temperati. Durante l'inverno questi laghi presentano una condizione di omeotermia (temperatura uniforme dalla superficie al fondo) e quindi tutta la massa d'acqua ha all'incirca la stessa densità. In primavera il lago inizia a riscaldarsi grazie alla radiazione solare. Il riscaldamento interessa però profondità modeste, poiché la radiazione infrarossa, la più efficiente dal punto di vista termico, viene fermata nei primissimi strati d'acqua. In presenza di vento si possono generare delle correnti che tendono a distribuire il calore a maggiori profondità.

Con il procedere della stagione, la temperatura atmosferica diviene via via più elevata: si determina quindi una condizione in cui il vento riesce a rimescolare sino al fondo, durante le ore notturne, soltanto le acque di laghi poco profondi.

Quando le differenze di densità fra i diversi strati diventano troppo grandi perché il lavoro del vento possa mantenere l'omeotermia, si ha una stratificazione termica, solitamente da maggio a ottobre. In questo periodo le acque sono suddivise in tre strati:

- uno strato superiore più caldo (epilimnio)
- uno strato più freddo e più profondo (ipolimnio)
- uno strato di modesto spessore che separa l'epilimnio dall'ipolimnio ed in cui si ha una brusca variazione di temperatura (termoclinio o metalimnio).



Andamento nel corso dell'anno della temperatura lungo la colonna d'acqua nel Lago Grande di Monticchio (Basilicata)

Col diminuire della temperatura, in autunno, le acque superficiali si raffreddano e tendono a mescolarsi con quelle più profonde; si instaura così un periodo di circolazione invernale, con conseguente omeotermia dell'intera massa d'acqua che permane, solitamente, da gennaio a marzo. In una situazione di omeotermia gli strati superficiali e profondi, entrando in contatto e mescolandosi, raggiungono anche da un punto di vista chimico una certa omogeneità.

Questo fenomeno riveste una particolare importanza per l'ossigenazione del corpo idrico, soprattutto per quanto riguarda gli strati più profondi del lago nei quali, con il procedere della stratificazione termica, l'ossigeno viene via via consumato dai processi di demolizione della sostanza organica fino a raggiungere condizioni di carenza (ipossia) o di mancanza totale (anossia): si tratta di situazioni che risultano difficilmente tollerabili per la maggior parte degli organismi. L'ossigeno disciolto è un parametro di importanza fondamentale per la vita nei laghi; le acque possono arricchirsi di ossigeno per scambio diretto con l'atmosfera o attraverso la fotosintesi degli organismi vegetali. L'ossigeno può poi ritornare in atmosfera per diffusione, oppure può essere consumato dai processi respiratori di tutti gli organismi acquatici, o dai processi chimici ossidativi. L'equilibrio tra questi scambi determina la distribuzione spaziale e le variazioni temporali dell'ossigeno in un corpo d'acqua.

In alcuni laghi possono instaurarsi condizioni, dette di meromissi, per cui l'acqua di fondo non entra mai in circolazione e rimane permanentemente segregata dal resto delle acque: si tratta di un fenomeno che interessa numerosi laghi vulcanici.

Nei laghi meromittici l'isolamento degli strati più profondi, la conseguente scomparsa dell'ossigeno ed i processi di decomposizione anaerobica determinano la comparsa di vari composti ridotti, come acido solfidrico (H_2S), ammonio (NH_4^+) e metano (CH_4). I sedimenti profondi assumono un colore nero o grigio ed hanno il caratteristico odore dell'acido solfidrico. Questa condizione ha ovviamente delle conseguenze negative sugli organismi che vivono in prossimità del fondo.



Lago di Bracciano (Lazio)



Lago di Bracciano (Lazio)

■ Altri gas e composti ionici

I sistemi lacustri devono essere considerati, da un punto di vista chimico, come dei sistemi aperti in grado di interagire con l'atmosfera sovrastante, con le rocce con cui sono in contatto e con gli apporti idrici sotterranei e superficiali.

I gas presenti nell'atmosfera, in particolare l'ossigeno e l'anidride carbonica, diffondono nell'acqua secondo la legge di Henry, in base alla quale la concentrazione di un gas disciolto è proporzionale alla sua pressione parziale sulla superficie del liquido, per mezzo di una costante (k) detta costante di Henry.

La concentrazione dei gas disciolti diminuisce con l'aumentare della temperatura ed è influenzata dai processi chimici e biologici che avvengono nel mezzo acquoso.

Le fonti che assicurano un adeguato approvvigionamento di anidride carbonica (CO_2) alle acque di un lago, oltre allo scambio con l'atmosfera, sono gli apporti meteorici, in quanto la pioggia si arricchisce di CO_2 durante il suo tragitto atmosferico, e i processi respiratori degli organismi.

La CO_2 sciolta nell'acqua tende ad idratarsi, formando acido carbonico, il quale a sua volta si dissocia dando origine, per perdita di un idrogenione, allo ione bicarbonato e successivamente, perdendo il secondo idrogenione, allo ione carbonato. Il complesso di queste reazioni chimiche, ciascuna regolata da una costante di equilibrio, prende il nome di equilibrio dei carbonati e bicarbonati. Quest'ultimo determina il valore di pH delle acque ad una data temperatura (generalmente compreso tra 7 e 9 unità) e lo mantiene inoltre costante, impedendo cioè brusche variazioni indotte da sostanze acide o basiche: questo fenomeno prende il nome di effetto tampone.

L'acqua, oltre ai gas, è in grado di solubilizzare sostanze polari o polarizzabili sia di natura organica che inorganica. Come effetto della capacità solvente dell'acqua, il contenuto salino di un'acqua naturale è altamente variabile e dipende da fenomeni di interazione con l'atmosfera, di drenaggio attraverso i terreni circostanti e di scambio con i sedimenti interni al corpo d'acqua. A controllare la composizione delle acque naturali sono quindi le rocce ed i suoli presenti nel bacino imbrifero, le precipitazioni atmosferiche, i processi di

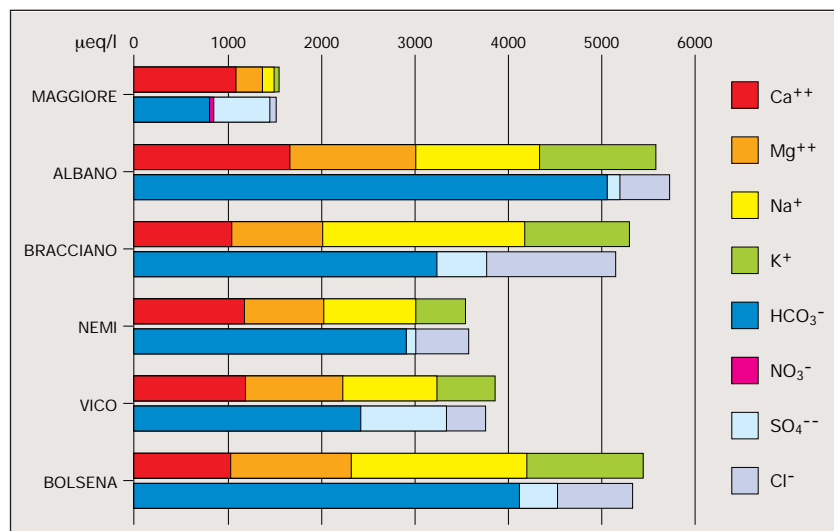


Lago Albano (Lazio)

cristallizzazione-evaporazione ed i processi biologici all'interno del corpo d'acqua (produzione-respirazione). I laghi vulcanici presentano un contenuto di sali disciolti molto elevato rispetto ad altri laghi italiani, come quelli subalpini. Infatti, si registrano valori di contenuto ionico totale che variano tra 7000 e 11000 $\mu\text{eq/l}$, mentre ad esempio nel Lago Maggiore il rispettivo valore è di 3000 $\mu\text{eq/l}$.

I principali costituenti ionici delle acque sono i cationi dei metalli alcalini ed alcalino terrosi come calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), sodio (Na^+) e potassio (K^+), i carbonati (CO_3^{--}) ed i bicarbonati (HCO_3^-), i solfati (SO_4^{--}) ed in misura minore i cloruri (Cl^-).

In base al contenuto salino le acque naturali si classificano in due categorie: acque leggere, con bassa salinità derivante di solito da drenaggio attraverso rocce ignee (scarsamente solubili), ed acque dure, contenenti alte concentrazioni di metalli alcalini ed alcalino terrosi, derivanti dal drenaggio attraverso depositi calcarei (solubili). Le acque naturali, il cui spettro ionico è determinato principalmente dalle rocce del bacino di drenaggio, sono tipicamente ricche di calcio e bicarbonato, quindi il rapporto tra i diversi ioni risulta il seguente: $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} = \text{Na}^+ > \text{K}^+$ per i cationi (ioni positivi); $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{--} > \text{Cl}^-$ per gli anioni (ioni negativi). Nei laghi vulcanici dell'Italia centrale questo ordine viene mantenuto solo parzialmente. Il contributo marino è importante in questi laghi, che infatti presentano un contenuto elevato di sodio e cloro rispetto ai corpi d'acqua situati lontano dal mare.



Concentrazioni medie degli ioni più significativi in alcuni laghi vulcanici e nel Lago Maggiore

Oltre agli spray marini, la principale sorgente di soluti per i laghi vulcanici è il dilavamento delle rocce e dei suoli che formano il bacino, apportando principalmente bicarbonato, calcio, magnesio, solfati e sodio. Tra gli anioni i bicarbonati sono dominanti, seguiti dai cloruri che nei laghi vulcanici sono presenti in quantità superiore rispetto ai solfati. Questi laghi sono in genere caratterizzati da un buon sistema tampone, responsabile delle modeste variazioni dei valori di pH alle varie profondità. Le concentrazioni dello ione H^+ sono prossime allo zero nelle acque di questi laghi, in quanto il pH è sempre superiore a 7. I valori medi di pH vanno da circa 7.5 nel Lago di Albano a 8.1 e 8.2 nei Laghi di Vico e di Bolsena, rispettivamente. Il pH è un parametro molto importante in quanto contribuisce a creare condizioni ambientali che maggiormente influenzano le possibilità di insediamenti flora-faunistici.

I cationi calcio, magnesio, sodio e potassio hanno concentrazioni tra loro confrontabili, con una leggera predominanza del sodio nei laghi di Bolsena e Bracciano.

Infine è da notare come i nitrati siano praticamente assenti nelle acque dei laghi vulcanici ($<10 \mu\text{eq/l}$), mentre hanno concentrazioni abbastanza elevate in vari laghi subalpini (50-60 $\mu\text{eq/l}$). I nitrati provengono per lo più dalle deposizioni atmosferiche che, nel Nord Italia come in altre aree fortemente antropizzate, ne sono particolarmente ricche a causa delle emissioni in atmosfera degli ossidi di azoto. Nei laghi vulcanici la componente di azoto maggiormente significativa è rappresentata invece dall'azoto organico.



Lago di Mezzano (Lazio)



Lago di Bracciano (Lazio)

■ I nutrienti algali: fosforo, azoto e silice

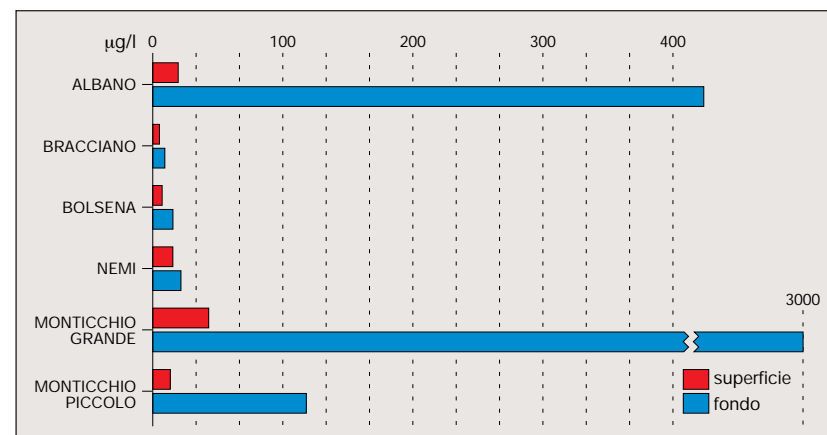
Oltre ai costituenti inorganici sopra citati, nelle acque lacustri assumono particolare importanza altri composti inorganici, comunemente identificati come nutrienti perché utilizzati nel metabolismo di alghe e microrganismi.

Il silicio, sotto forma di silice (SiO_2), è un elemento importante soprattutto per le diatomee, un gruppo di alghe che utilizzano questo elemento per la formazione del loro "rivestimento", regolandone quindi la concentrazione in soluzione. La silice in un lago presenta delle fluttuazioni stagionali evidenti, ovvero si accumula in inverno per diminuire poi drasticamente in primavera nel momento di fioritura delle diatomee.

Il fosforo, nelle sue forme altamente ossidate, come l'ortofostato (PO_4^{3-}), partecipa attivamente ai cicli biologici fungendo da nutriente per gli organismi lacustri. Il fosforo presenta, come la silice, variazioni stagionali e spaziali all'interno di un lago: negli strati superficiali, dove hanno luogo i processi fotosintetici, diminuisce in corrispondenza dei periodi di massimo sviluppo algale; in estate aumenta nelle acque più profonde a causa della sedimentazione delle spoglie degli organismi provenienti dagli strati superficiali.

L'azoto, nelle forme di nitrati (NO_3^-), nitriti (NO_2^-), ione ammonio (NH_4^+) e azoto organico, è un componente nutritivo essenziale per la vita di molti organismi.

Le dinamiche dell'azoto in un lago sono legate, come quelle del fosforo, ai processi biologici e quindi all'assimilazione da parte di alghe e batteri. Il passaggio da una forma all'altra di azoto è regolato prevalentemente da microrganismi. In estate, quando l'intensità luminosa e la temperatura sono suffi-



Concentrazioni medie di fosforo totale (esprese in µg/l) in superficie e sul fondo di alcuni laghi vulcanici

cienti a mantenere un'elevata crescita algale, la produzione viene controllata dalla disponibilità di sali nutrienti. In particolare è l'elemento presente in quantità minore rispetto al fabbisogno algale a limitare la produzione. Nei laghi, in genere, l'elemento limitante è il fosforo.

A seconda del contenuto in nutrienti, un lago viene classificato in diversi stati trofici, che vanno dalla oligotrofia (pochi nutrienti e bassa produttività algale) all'eutrofia (lago molto produttivo ricco in nutrienti), passando per una condizione intermedia di mesotrofia. Lo stato trofico ha riflessi importanti sulle caratteristiche chimico-fisiche delle acque di un lago e sulla composizione delle biocenosi che lo popolano. Il fenomeno di eccessivo arricchimento in nutrienti di un lago (in particolare fosforo), dovuto agli apporti antropici, è definito eutrofizzazione. Questo processo determina uno scadimento qualitativo delle acque, con conseguenti effetti sul loro utilizzo per esempio per la potabilizzazione, l'irrigazione, la balneazione e altri usi ricreativi.

Negli anni '70 i risultati di studi di monitoraggio effettuati sui laghi vulcanici laziali da parte del C.N.R. (Consiglio Nazionale delle Ricerche) avevano messo in evidenza basse concentrazioni di fosforo e scarsa produttività di questi laghi, che erano classificati per la maggior parte come oligotrofi. Il recente aumento delle concentrazioni di fosforo, causato da attività antropiche, ha determinato una classificazione per alcuni di questi bacini nella più alta classe trofica, con il conseguente problema dello scadimento della qualità delle acque, come illustrato in dettaglio nel capitolo relativo alla gestione e conservazione.



Lago di Nemi (Lazio)

■ I metalli pesanti in traccia

Un'altra caratteristica che differenzia i laghi di origine vulcanica dagli altri corpi d'acqua è il contenuto in metalli pesanti. Confrontando le concentrazioni dei principali metalli nelle acque dei laghi vulcanici con quelle di un grande lago subalpino (Lago Maggiore), si può notare che in quest'ultimo le concentrazioni sono molto più basse, prossime al limite di detezione delle metodiche di analisi, ad eccezione dello stronzio che è presente in alcuni minerali. I laghi vulcanici hanno in genere acque ricche di metalli in soluzione, in particolare boro e stronzio, entrambi indicatori di attività geotermica. Anche i metalli più comuni, come ferro, manganese e zinco, che derivano principalmente dalle rocce presenti nel bacino, sono presenti con concentrazioni molto più elevate nei laghi Bolsena, Albano e Monticchio rispetto al Maggiore. La spiegazione di queste caratteristiche peculiari va ricercata nella natura litologica dei bacini, caratterizzati in prevalenza da tufi litoidi e incoerenti e rocce effusive; le abbondanti strutture porose e permeabili di queste rocce permettono un forte dilavamento operato dalle acque meteoriche con conseguente arricchimento in metalli delle acque lacustri.



Lago Grande di Monticchio (Basilicata)

	BOLSENA		ALBANO		MONTICCHIO (Grande)		MAGGIORE	
	0 m	130 m	20 m	160 m	0 m	35 m	0 m	360 m
Alluminio	9	9	6	0	15	182	14	5
Boro	390	395	86	94	53	64	4	-
Bario	35	38	13	22	84	289	10	10
Rame	-	4	-	-	-	0.4	0.5	0.2
Ferro	-	25	-	75	46	5900	8	4
Manganese	-	21	-	105	99	3572	1	5
Zinco	-	20	-	-	2	2	1	1
Litio	42	41	4	4	3	3	1	-
Stronzio	420	450	753	893	479	630	208	227

Concentrazioni (esprese in µg/l) dei principali metalli pesanti nelle acque superficiali e di fondo in alcuni laghi vulcanici e nel Lago Maggiore

Fitoplancton

GIUSEPPE MORABITO

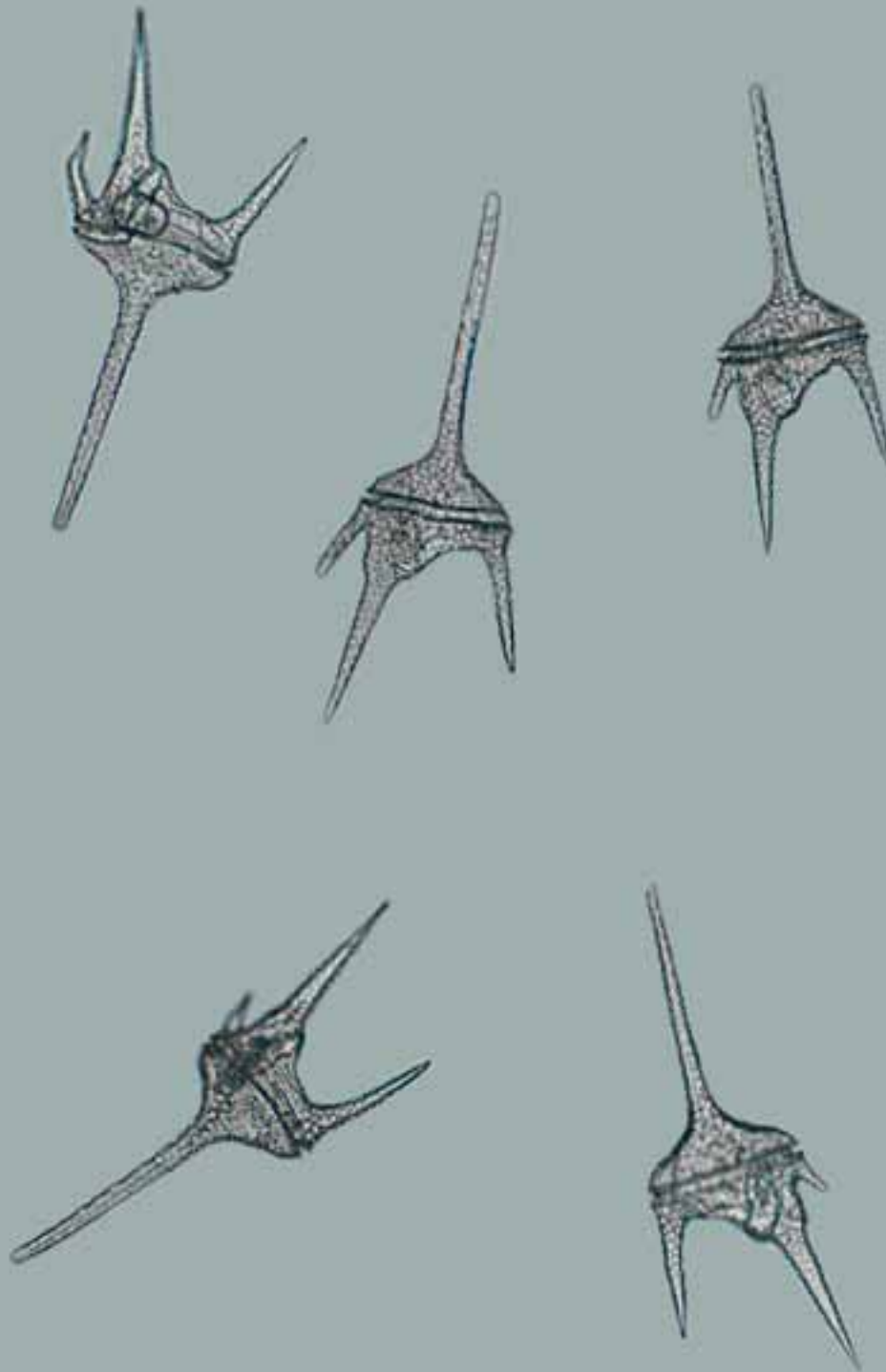
I laghi vulcanici appaiono, da un punto di vista paesaggistico, come ambienti lacustri dall'aspetto particolare: ad un primo sguardo, l'occhio dell'osservatore viene immediatamente colpito sia dalla forma caratteristica, che segue il profilo del cratere in cui la massa d'acqua è ospitata, che dalle alte sponde, la cui morfologia conferisce spesso alla conca lacustre l'aspetto di un gigantesco bacile.

Tuttavia, la raccolta di un campione d'acqua dal pelago e l'osservazione dei microscopici organismi algali in esso presenti (fitoplancton), non riserva al limnologo o al naturalista le sorprese che forse egli potrebbe attendersi: infatti, in generale, un lago vulcanico non mostra, nell'arco delle stagioni, condizioni fisiche e chimiche estreme, tali da selezionare alcune specie algali in grado di colonizzare solo questo tipo di ambienti lacustri. Al contrario, è molto comune ritrovare, anche in questi specchi d'acqua, specie fitoplanctoniche che colonizzano laghi molto diversi dai vulcanici. È comunque possibile che alcune di queste specie trovino, proprio nei laghi vulcanici, le condizioni ideali per svilupparsi diventando dominanti, grazie alla combinazione ottimale di alcuni parametri fisici e chimici, che si realizza, preferibilmente, in questi bacini.

Nella trattazione che segue, verranno dapprima presi brevemente in considerazione i fattori che, prevalentemente, guidano la crescita delle alghe planctoniche nei laghi, sottolineando le principali caratteristiche dei laghi di origine vulcanica in relazione alle variabili esaminate, con lo scopo di tracciare un quadro d'insieme dell'habitat che gli organismi algali sperimentano in questi bacini. Questo aiuterà il lettore a comprendere le ragioni per cui alcune specie fitoplanctoniche divengono dominanti in questa tipologia di ambienti lacustri.



Lago di Mezzano (Lazio)



Ceratium hirundinella

■ Fattori che regolano la crescita del fitoplancton

Le variabili che controllano la crescita del fitoplancton nelle acque lacustri sono molteplici ed interagiscono le une con le altre secondo schemi spesso difficili da comprendere. Tuttavia, è evidente che anche gli organismi del fitoplancton, come tutti i vegetali, necessitano per crescere di adeguate condizioni di luce e temperatura, oltre che, naturalmente, di nutrienti sufficienti.

Temperatura e luce. Gli studi condotti dagli ecologi del fitoplancton hanno messo in evidenza che, in ambiente lacustre, due fattori in particolare, ovvero temperatura e luce solare, sono determinanti nel condizionare il successo o meno delle singole specie algali. Analogamente a quanto si osserva in ambiente terrestre, anche in ambiente acquatico temperatura e luce devono rispettare i valori limite compatibili con la vita degli organismi vegetali e l'intervallo di questi valori può essere diverso da un organismo all'altro. Inoltre, la radiazione luminosa che penetra nella colonna d'acqua, apportando anche energia termica, è responsabile della formazione di strati d'acqua con caratteristiche termiche differenti.

La variazione stagionale della temperatura in ambiente pelagico lacustre segue solitamente, come già esposto nel capitolo relativo all'idrochimica, un ciclo regolare che vede l'alternanza tra momenti di completo mescolamento della colonna d'acqua e fasi di stratificazione. Le differenze di temperatura



Lago di Vico (Lazio)

causano differenze di densità del mezzo liquido e queste piccole variazioni condizionano drasticamente la vita delle alghe che, avendo una densità di poco superiore a quella dell'acqua, devono contrastare la naturale tendenza a sedimentare per gravità verso il fondo del lago. La sopravvivenza del fitoplancton nell'ambiente pelagico è dunque condizionata dal possedere meccanismi che permettono di rallentare la sedimentazione: per esempio le alghe possono variare la loro morfologia attraverso adattamenti quali l'au-



Dinoflagellati del genere *Peridinium*

mento della superficie cellulare o la formazione di colonie, oppure possono regolare attivamente la propria posizione all'interno della colonna d'acqua, tramite strumenti di propulsione (flagelli o setole mobili), vacuoli pieni di gas o la sintesi di composti a basso peso specifico.

Per quanto attiene l'intensità della radiazione luminosa, il fitoplancton mostra comportamenti variabili: alcune alghe stanno bene dove la luce è abbondante, quindi vicino alla superficie mentre altre si sviluppano meglio qualche metro sotto il pelo dell'acqua. La radiazione luminosa è però importante non solo per la sua quantità, ma anche per la sua qualità, che dipende dalla natura delle particelle in sospensione nella colonna d'acqua. Queste particelle agiscono come dei filtri colorati, selezionando alcune lunghezze d'onda dello spettro luminoso e conferendo quindi all'acqua di un lago precise proprietà ottiche ed un colore che, tipicamente, varia tra l'azzurro ed il verde, in relazione al crescere della quantità di fitoplancton, per virare verso il bruno o il giallo in ambienti dove sono presenti elevate concentrazioni di sostanze organiche complesse di origine vegetale. La biocenosi fitoplanctonica risponde alle variazioni qualitative dello spettro luminoso con la selezione di specie che, grazie al loro corredo di pigmenti fotosintetici (molecole preposte a catturare l'energia luminosa necessaria per la fotosintesi), si presentano come le favorite per sfruttare le condizioni luminose dell'ambiente.

I primi studi limnologici sui laghi vulcanici italiani li descrivono, in prevalenza, come ambienti lacustri dalla trasparenza elevata, nei quali dunque la radiazione luminosa non rappresenta, in termini qualitativi e quantitativi, un fattore limitante per la crescita del fitoplancton: l'eccellente qualità ottica delle acque è una caratteristica originaria di questi ambienti, probabilmente legata alla loro morfologia. Infatti, i laghi occupano spesso la sommità dell'edificio vulcanico, per cui l'area da cui possono provenire acque immissarie è decisamente

modesta, soprattutto in relazione alla superficie dello specchio lacustre. Per questa ragione è estremamente difficile che giungano al lago dal bacino circostante masse d'acqua consistenti, che possano trasportare quantità significative di solidi sospesi, in grado di alterare le proprietà ottiche del lago stesso. La trasparenza elevata dei laghi vulcanici permette alla luce di penetrare fino a profondità ragguardevoli nella colonna d'acqua: a titolo di esempio, si può citare lo studio limnologico condotto alla fine degli anni '60 da ricercatori dell'Istituto Italiano di Idrobiologia di Pallanza (oggi Istituto per lo Studio degli Ecosistemi del Consiglio Nazionale delle Ricerche), durante il quale, nei laghi di Bolsena, Bracciano e Vico, si osservò costantemente una zona eufotica profonda fino a circa 30 metri. Questa caratteristica, come vedremo in seguito, ha delle conseguenze importanti sulla selezione di alcune specie algali che trovano nei laghi vulcanici condizioni di sviluppo molto favorevoli.

Nutrienti. La disponibilità di nutrienti, in particolare di quelli presenti in quantità limitante, è probabilmente il fattore che più condiziona la crescita algale, dopo luce e temperatura. A partire dai primi anni '70, le ricerche finalizzate allo studio del fenomeno dell'eutrofizzazione hanno permesso di individuare nel fosforo il principale nutriente limitante per il fitoplancton in ambiente pelagico lacustre. La maggior parte dei laghi vulcanici, come accennato nel capitolo precedente, è passata dalle originarie condizioni oligotrofiche ad uno stato di mesotrofia o eutrofia: questi cambiamenti hanno comportato anche modifica-



Lago Grande di Monticchio (Basilicata)

zioni profonde delle comunità fitoplanctoniche originarie, con la scomparsa di specie legate ad acque oligotrofiche, che sono state sostituite da altre, meglio adattate alle nuove condizioni ambientali.

Nel caso dei laghi di origine vulcanica, il risultato di questa sostituzione di specie è stata, in parte, condizionata anche dalla morfologia del bacino lacustre: questa, infatti, influisce sui processi e sulle quantità con cui i nutrienti algali si rendono disponibili per essere utilizzati dalle alghe planctoniche. Così,

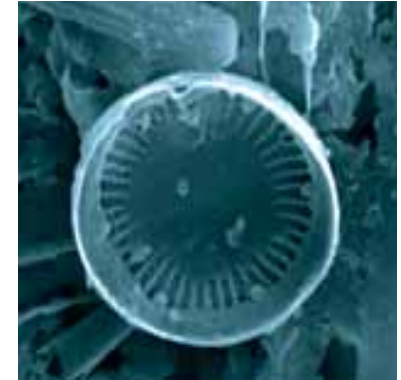
nei laghi vulcanici poco profondi, come Monterosi o il Lago Grande di Monticchio, quando si creano le condizioni per il rimescolamento della massa d'acqua, grazie alla modesta profondità anche i nutrienti inorganici mineralizzati a livello dei sedimenti possono tornare nelle acque superficiali ed essere utilizzati dalle alghe planctoniche.

Viceversa, nei laghi vulcanici più profondi la possibilità che un rimescolamento della massa d'acqua vada ad interessare i fondali lacustri è fortemente limitata: in questi ambienti i nutrienti inorganici accumulatisi in profondità rimangono segregati in strati d'acqua inaccessibili per il fitoplancton.

■ Struttura delle associazioni fitoplanctoniche

Le osservazioni di carattere generale espresse nei paragrafi precedenti ci hanno permesso di definire il quadro limnologico proprio dei laghi di origine vulcanica, delineando il complesso di condizioni che gli organismi algali devono fronteggiare per poter colonizzare questi ambienti lacustri. Riassumendo brevemente, un'alga trasportata in un lago vulcanico "tipico", si troverà in un ambiente dove la temperatura dell'acqua va incontro ad una forte escursione termica stagionale, con la formazione, nel periodo estivo, di strati d'acqua termicamente diversi e separati da forti gradienti di temperatura, dove la trasparenza è elevata e la radiazione luminosa può raggiungere profondità considerevoli, dove il ricambio della massa d'acqua è molto lento e gli apporti idrologici dal bacino imbrifero modesti. La disponibilità dei nutrienti è variabile in relazione allo stato trofico ed alla morfologia del bacino, come, del resto, si osserva comunemente in altri laghi.

La composizione specifica delle associazioni fitoplanctoniche va incontro a modificazioni stagionali, regolate dal cambiamento delle condizioni ambientali.



Cyclotella comensis



Stephanodiscus minutulus

A partire dalla fine dell'inverno, quando la colonna d'acqua è in fase di mescolamento e la radiazione solare diviene più intensa, assistiamo allo sviluppo delle diatomee: queste sono le tipiche alghe pioniere, che si sviluppano rapidamente nella colonna d'acqua non ancora colonizzata da altri gruppi algali, grazie alla loro crescita rapida ed all'efficienza elevata nell'assimilare i nutrienti. Le diatomee sono caratterizzate dal possesso di un guscio siliceo detto "frustulo", che ingloba le cellule, rendendole particolarmente pesanti e,

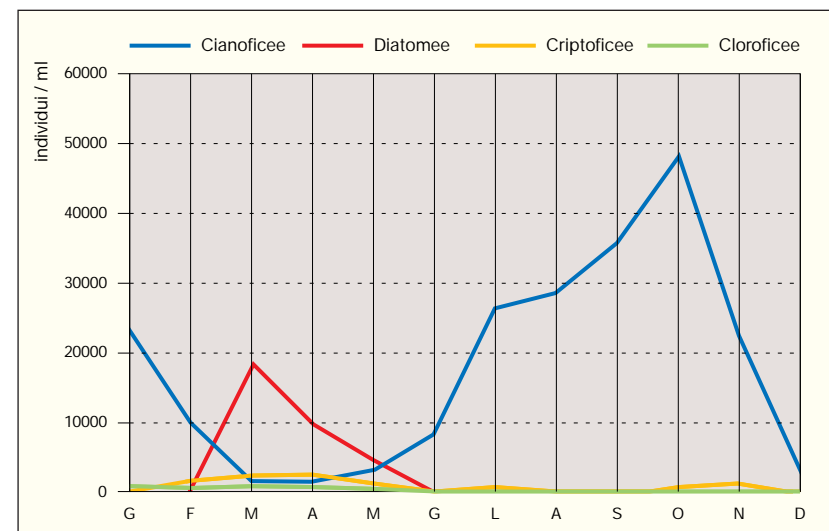
dunque, condannandole ad una rapida sedimentazione al di fuori degli strati d'acqua illuminati dalla radiazione solare. Anche per questo motivo la loro fase di crescita è strettamente legata al periodo di massima turbolenza delle acque lacustri, poiché il rimescolamento delle acque ne contrasta la sedimentazione. Nei laghi vulcanici italiani le diatomee dominanti sembrano essere le centriche, almeno stando alle informazioni che ci vengono dagli studi condotti sui laghi laziali: negli anni precedenti il peggioramento dello stato trofico, il genere più rappresentato era *Cyclotella*, all'interno del quale le specie *C. comensis*, *C. kuetzingiana* e *C. ocellata* erano tra le più abbondanti, secondo quanto riportato in letteratura. Con lo spostamento verso condizioni più elevate di trofia, queste specie di *Cyclotella* sono state, in diversi ambienti, rimpiazzate da alcune specie di *Stephanodiscus* (*S. parvus*, *S. minutulus*, *S. hantzschii*), un altro genere di diatomee centriche, che, contrariamente a *Cyclotella*, preferisce ambienti con una maggiore disponibilità di nutrienti. L'alternanza tra questi due generi è emersa in modo molto chiaro da ricerche paleolimnologiche condotte sui laghi vulcanici del Lazio, che hanno permesso di ricostruire l'evoluzione trofica attraverso l'analisi dei frustuli di diatomee depositati nei sedimenti lacustri.

Queste indagini, attraverso le quali è stato possibile stabilire la composizione della comunità a diatomee dei laghi di Nemi e Albano fin dal tardo Pleistocene, hanno rivelato l'esistenza di oscillazioni tra diatomee di acque eutrofe e diatomee di acque oligotrofe anche in periodi precedenti l'inizio delle attività antropiche, probabilmente a seguito di eventi climatici, che determinarono aumenti di temperatura delle acque, o di periodi di attività geotermica, che influirono sulla disponibilità di nutrienti algali. Informazioni di tipo paleolimnologico relative alla struttura delle associazioni fitoplanctoniche del passato si possono, purtroppo, ottenere solo per le alghe che lasciano tracce fossili, ovvero diato-

mee e crisoficee. Queste ultime, peraltro, sono scarsamente rappresentate nei laghi vulcanici, come risulta sia da dati paleolimnologici, che da informazioni sulle comunità algali recenti di questi ambienti.

In generale, sia diatomee che crisoficee sono tipici esponenti della flora fitoplanctonica primaverile, non solo nei laghi vulcanici. Come spiegato nel capitolo precedente, le condizioni ambientali si modificano sostanzialmente nel passaggio dalla primavera all'estate con l'instaurarsi della stratificazione termica. I nutrienti che, rimessi in circolazione alla fine dell'inverno, avevano sostenuto la crescita primaverile delle diatomee, risultano ora quasi completamente esauriti nell'epilimnio. Tuttavia, il metalimnio può rappresentare una importante riserva di azoto e fosforo, poiché, a causa dei gradienti di temperatura e densità, la materia organica in sedimentazione si deposita, per periodi più o meno lunghi, in questo strato d'acqua. Le differenze di densità dell'acqua nel metalimnio costituiscono una barriera fisica che si oppone alla sedimentazione del materiale organico particellato che, soffermandosi all'interno di questo strato d'acqua, viene qui mineralizzato, dando origine a depositi di sali nutritivi che possono essere sfruttati dalle alghe per la crescita.

Naturalmente, non tutte le alghe sono capaci di sfruttare questa riserva: le diatomee tendono a diminuire, in questa fase stagionale, essenzialmente per tre motivi. Il primo è lo stabilirsi della stratificazione termica e la forte riduzione della turbolenza che le manteneva in sospensione; il secondo è l'esaurimento dei sali di silice, consumati per costruire il frustulo e divenuti ormai limitanti per



Andamento stagionale dei principali gruppi fitoplanctonici nel Lago di Nemi (1982)

Planktothrix rubescens è una tipica specie metalimnetica, in quanto la sua caratteristica ecologica più evidente è quella di formare densi accumuli in corrispondenza del metalimnio lacustre che, ricordiamo, è quello strato d'acqua in cui si misura il gradiente termico più elevato nel periodo di stratificazione estiva della colonna d'acqua.

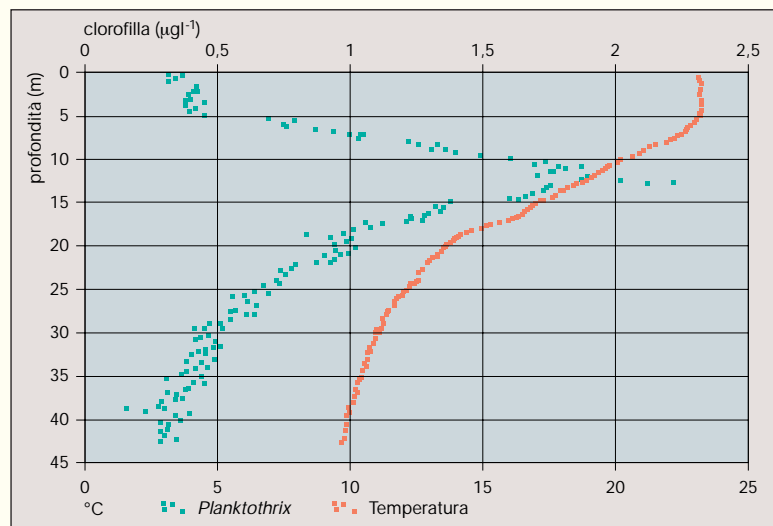
P. rubescens è una specie stenoterma fredda, con un optimum di crescita intorno ai 15°C ed è una specie sciafila, che predilige acque dove la radiazione luminosa è relativamente bassa. Dal punto di vista trofico, *P. rubescens* cresce meglio in ambienti piuttosto ricchi di nutrienti.

Questa combinazione di acque fredde, debolmente illuminate e con nutrienti abbondanti, si realizza perfettamente nel metalimnio dei laghi profondi, indicativamente localizzato ad una profondità tra i 10 ed i 15

metri: gran parte della radiazione luminosa subacquea si attenua prima di raggiungere questa profondità e, di conseguenza, anche il riscaldamento di questo strato d'acqua è limitato. Inoltre, il gradiente termico provoca differenze di densità dell'acqua che favoriscono l'accumulo metalimnetico della sostanza organica in sedimentazione, che qui viene decomposta e mineralizzata.

È quindi comprensibile che *P. rubescens* trovi nel metalimnio le condizioni ottimali per il suo sviluppo.

Questa specie è avvantaggiata anche dal possesso di particolari pigmenti fotosintetici, che, oltre a conferire a questo organismo il colore rosso, gli permettono di utilizzare in modo efficiente anche le basse intensità luminose. Inoltre *P. rubescens* possiede vacuoli gassosi intracellulari, grazie ai quali può regolare attivamente la sua posizione nello strato d'acqua.



Relazione fra la presenza di *Planktothrix rubescens* e la temperatura dell'acqua con l'aumento della profondità

la loro crescita; il terzo è la predazione da parte dello zooplancton erbivoro, in particolare dei Cladoceri, che possono ridurre sensibilmente l'abbondanza dei popolamenti algali primaverili, dando spesso luogo al fenomeno della clear-water. Si tratta di un momento stagionale in cui la colonna d'acqua risulta particolarmente trasparente a causa della rimozione delle alghe da parte dello zooplancton.

Le diatomee lasciano dunque le acque libere per lo sviluppo di altri organismi algali. Quali sono questi organismi?

Indagini sulla flora pelagica dei laghi di Nemi e Albano, compiute negli anni '30 e '40 del secolo appena trascorso, sembrano indicare le dinoflagellate tra le alghe di maggior successo nelle associazioni fitoplanctoniche estive dei laghi di origine vulcanica. In particolare, una delle specie più rappresentate era *Ceratium hirundinella*, che con la sua morfologia affascinante rappresenta una sorta di iconografia del fitoplancton lacustre. Probabilmente due sono i fattori chiave del suo vantaggio competitivo: il primo è il possesso dei flagelli, che permettono a questo organismo di spostarsi attivamente nella colonna d'acqua alla ricerca delle migliori condizioni per la crescita. Grazie alle capacità di movimento autonome, *Ceratium* è in grado di effettuare delle migrazioni tra le acque superficiali, ben illuminate, dove può svolgere la fotosintesi e lo strato del metalimnio, dove può rifornirsi di nutrienti. Il secondo fattore decisivo è rappresentato dalle dimensioni di questa alga, che le consentono di immagazzinare quantità consistenti di nutrienti e di fare quindi una buona scorta quando se ne presenta l'occasione: questa capacità è particolarmente vantaggiosa in ambienti poveri di nutrienti, come erano i laghi vulcanici italiani prima del 1960.

Nei laghi vulcanici andati incontro ad un peggioramento delle condizioni trofiche si è assistito al generale declino delle dinoflagellate, la cui posizione dominante nelle comunità algali estive è stata assunta dai cianobatteri, comunemente conosciuti anche come alghe azzurre. Le specie che hanno ottenuto il maggior successo nei laghi di origine vulcanica variano in relazione alla tipologia dell'ambiente considerato. Infatti, nei laghi vulcanici profondi si è insediata in modo quasi esclusivo *Planktothrix rubescens*, mentre in quelli a profondità modesta dominano taxa appartenenti ai cianobatteri crococcali (*Microcystis*, *Woronichinia*, *Merismopedia*). *Planktothrix rubescens* è un cianobatterio che forma colonie simili a lunghi filamenti ed è una delle specie algali meglio studiate, grazie anche alla sua vasta diffusione nel mondo ed al fatto che le sue



Planktothrix rubescens

Cianobatteri del genere *Woronichinia*

fioriture, che conferiscono alle acque un colore rosso, furono uno dei segnali più evidenti del peggioramento delle condizioni trofiche in molti dei laghi profondi europei. Le sue caratteristiche ecofisiologiche sono quindi ben conosciute e ci permettono di comprendere le ragioni che hanno portato al successo di questa specie anche nei laghi vulcanici profondi italiani (vedi scheda a pag. 50). Una colonna d'acqua trasparente fino a profondità elevate, rappresenta una nicchia ecologica ottimale per lo sviluppo di *P. rubescens*. La trasparenza naturalmente elevata dei laghi vulcanici garantisce sempre una zona eufotica sufficientemente profonda per includere lo strato metalimnetico e questo rappresenta

un ulteriore elemento che favorisce la crescita di *P. rubescens* nei laghi vulcanici profondi, come il Lago Albano e quello di Nemi. Nei laghi di origine vulcanica con scarsa profondità è raro che si formi un metalimnio stabile e che vi siano condizioni permanenti di elevata trasparenza: infatti una colonna d'acqua poco profonda può facilmente essere soggetta ad un completo rimescolamento, per esempio in occasione di vento forte, e la turbolenza può interessare anche gli strati vicini al fondo, con conseguente risospensione di materiale sedimentato ed aumento della torbidità dell'acqua. Inoltre, una colonna d'acqua poco profonda può raggiungere temperature mediamente elevate fino al fondo.

Da quanto detto in precedenza, è evidente che queste condizioni inibiscono un possibile sviluppo di *Planktothrix*, risultando invece ideali per una diversa tipologia di cianobatteri, rappresentata dalle croococcali: queste sono alghe che formano colonie globulari, di forma irregolare (*Microcystis*) o sferica (*Woronichinia*), oppure colonie regolari di forma rettangolare (*Merismopedia*). Le cellule sono immerse in una matrice mucillaginosa, che permette a questi organismi di galleggiare facilmente e di riguadagnare la superficie anche dopo episodi di rimescolamento della colonna. La maggior parte di questi cianobatteri croococcali, inoltre, sono ben tolleranti verso temperature e radiazioni luminose elevate, caratteristiche che consentono loro di colonizzare con successo gli strati più superficiali della colonna d'acqua. La scarsa profondità di questi bacini favorisce, al momento del mescolamento, il ritorno verso la superficie di notevoli

quantità di nutrienti, che erano accumulati nelle acque di fondo, innescando spesso fioriture di cianobatteri croococcali, che formano sulla superficie del lago estesi tappeti o striature. Esempi di fioriture di questi cianobatteri si possono osservare nel Lago Grande di Monticchio. L'avvento dei cianobatteri nei laghi vulcanici ha avuto anche delle ripercussioni sulla diversità della rete trofica, determinando la scomparsa di *Eudiaptomus padanus etruscus*, un copepode frequente in questi ambienti nel periodo pre-eutrofizzazione, come descritto nel capitolo sullo zooplancton. Al termine di questa trattazione risulta utile riassumere alcuni principi generali del capitolo. In primo luogo risulta che la dinamica di una biocenosi fitoplanctonica in ambiente pelagico lacustre è regolata dalla interazione di numerosi fattori fisici, chimici e biotici, la cui importanza relativa varia tra un ambiente e l'altro e nell'arco delle stagioni. Tra le variabili strutturanti la composizione in specie delle biocenosi algali, gli studi più accreditati sull'ecologia del fitoplancton hanno attribuito ai fattori fisici il ruolo più significativo nel guidare l'alternanza delle specie. Per questa ragione la descrizione delle comunità fitoplanctoniche nei laghi vulcanici ha tenuto in particolare considerazione gli adattamenti delle specie algali alle variazioni di luce e temperatura. Ma questa non è la sola ragione: infatti, l'ambiente fisico dei laghi di origine vulcanica presenta, effettivamente, alcune caratteristiche che differenziano questi dagli altri ambienti lacustri e li rendono particolarmente adatti ad essere colonizzati da alcune specie algali, peraltro non esclusive di questa tipologia di acque dolci.

La letteratura scientifica esistente sul fitoplancton dei laghi vulcanici ha però messo in evidenza come molti di questi ambienti siano estremamente vulnerabili ad un eccessivo impatto antropico: infatti, il lento ricambio idrologico di queste acque ha favorito l'accumulo, in tempi relativamente brevi, di concentrazioni elevate di nutrienti algali e il cambiamento delle caratteristiche chimiche ha innescato alterazioni, a volte profonde, della struttura delle biocenosi fitoplanctoniche, portando alla dominanza di specie algali che, in alcuni casi, possono seriamente compromettere la fruizione di queste acque. Esempio emblematico sono le fioriture di cianobatteri potenzialmente tossici, di cui alcuni casi sono stati recentemente documentati per i laghi vulcanici laziali.

*Microcystis wesenbergii*