



*Direttore*

Benedetto DE VIVO  
Università degli Studi di Napoli “Federico II”

*Comitato scientifico*

Annamaria LIMA  
Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Domenico CICCHELLA  
Università degli Studi del Sannio

Stefano ALBANESE  
Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Alecos DEMETRIADES  
Institute of Geology and Mineral Exploration

## CONOSCENZA GEOCHIMICA DEL TERRITORIO

La conoscenza geochimica del territorio si è resa indispensabile dal momento che la contaminazione degli ecosistemi terrestri con sostanze ed elementi chimici tossici è divenuto un problema a livello globale. L'assunzione attraverso il cibo, l'acqua e le vie respiratorie degli inquinanti ha un impatto sulla salute che può manifestarsi anche sul lungo termine e in modi diversi. L'incidenza e la distribuzione geografica delle malattie (epidemiologia) dovute ad inquinamento ambientale è ben documentata. Queste malattie comprendono, perdita di acutezza mentale e di controllo motorio, disfunzione di organi critici, cancro, malattie croniche, inabilità e, alla fine, anche morte. La conoscenza geochimica del territorio fornisce elementi indispensabili per valutare scientificamente come "gestire" le concentrazioni anomale di sostanze ed elementi chimici tossici, sia alla sorgente che in-situ, in modo da eliminare o comunque minimizzare il loro impatto negativo sulla salute degli esseri viventi; individuare le sorgenti dell'inquinamento e sviluppare modelli per il controllo fisico, chimico e biologico relativamente alla loro mobilitazione, interazione, deposizione e accumulo negli ecosistemi terrestri. Su queste basi geologi, geochimici, chimici, biologi, ingegneri ambientalisti collaborano per sviluppare metodi e tecnologie finalizzate a preservare gli ecosistemi globali.

La collana "Conoscenza geochimica del territorio" vuole offrire ad un pubblico attento, anche se non necessariamente specialistico, gli strumenti necessari per comprendere e trattare in modo innovativo problemi di grande attualità come quelli della contaminazione ambientale e della salvaguardia del territorio e dei suoi ecosistemi naturali.



Francesca Tecce  
Claudia Cannatelli  
Benedetto De Vivo

**Le inclusioni fluide e silicatiche nei minerali**



Copyright © MMXVI  
Aracne editrice int.le S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Quarto Negroni, 15  
00040 Ariccia (RM)  
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-9079-4

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: marzo 2016

- 11 *Prefazione*
- 13 **Capitolo I**  
I fluidi nei sistemi planetari
- 1.1. I fluidi nei giacimenti minerali. 1.2. I volatili nei sistemi magmatici e vulcanici. 1.3. L'acqua nel mantello. 1.4. Fluidi, faglie e flusso. 1.6. L'acqua extraterrestre.
- 17 **Capitolo II**  
Le inclusioni fluide nei minerali
- 27 **Capitolo III**  
Introduzione alle inclusioni fluide
- 3.1. Classificazine temporale. 3.2. Associazioni di Inclusioni Fluide (FIA).
- 35 **Capitolo IV**  
Analisi petrografica delle inclusioni fluide
- 4.1. Filosofia del campionamento. 4.2. Preparazione dei campioni. 4.3. Approcci per analisi di immagini.
- 41 **Capitolo V**  
Indagini microtermometriche:  $T_h$  e  $T_m$ . Aspetti patici e teorici
- 5.1. Microtermometria con tavolini riscaldanti-raffreddanti. 5.2. Terminologia riguardante la microtermometria. 5.3. Calibrazione e standards. 5.4. Strategie microtermometriche. 5.5. Cycling. 5.6. Epilogo.
- 55 **Capitolo VI**  
Inclusioni fluide. Sistemi  $H_2O$ ;  $CO_2$ ;  $H_2O-NaCl-KCl$ ;  $H_2O-NaCl-CaCl_2$
- 6.1. Sistema  $H_2O$ -Diagramma P-T. 6.2. Sistema  $H_2O-NaCl$ . 6.3. Determinazione della composizione delle inclusioni. 6.4. Isocore il sistema  $H_2O-NaCl$ . 6.5. Interpretazione di inclusioni intrappolate nel campo delle fasi (Immiscibilità). 6.6. Sistema  $H_2O-CO_2$ . 6.7. Sistema  $H_2O-NaCl-KCl$ . 6.8. Sistema  $H_2O-NaCl-CaCl_2$ .
- 73 **Capitolo VII**  
Interpretazione e utilizzazione dei dati microtermometrici: metastabilità
- 7.1. Associazioni di fasi metastabili in inclusioni fluide. 7.2. Associazioni di fasi metastabili in inclusioni silicatiche. 7.3. Metastabilità risultante da forma e posizione.

81 Capitolo VIII  
Riequilibrazioni delle inclusioni fluide

8.1. Cosa determina quanto facilmente un'inclusione riequilibra? 8.2. Come si riconoscono le inclusioni riequilibrate? 8.3. Riequilibrazioni di inclusioni vetrose. 8.4. Come evitare la riequilibrio di inclusioni fluide causata in laboratorio.

91 Capitolo IX  
Introduzione alle inclusioni silicatiche (melts)

9.1. Cosa sono le inclusioni vetrose? 9.2. Classificazione delle inclusioni vetrose 9.3. Come condurre uno studio sulle inclusioni vetrose. 9.4. Come selezionare le inclusioni vetrose rappresentative. 9.5. L'approccio microtermometrico.

103 Capitolo X  
I dati microtermometrici del sistema  $H_2O-CO_2$

10.1. Descrizione delle relazioni di fase  $H_2O-CO_2$ . 10.2. Comportamento delle inclusioni fluide a  $CO_2-H_2O$  durante il riscaldamento e raffreddamento. 10.3. Interpretazione degli stati fluidi e la loro evoluzione a partire da inclusioni fluide a  $CO_2-H_2O$ . 10.4. Stima quantitativa delle proprietà PVTX d'inclusioni  $CO_2-H_2O$ . 10.5. Conclusioni.

129 Capitolo XI  
I dati microtermometrici del sistema  $CO_2-CO_4-N_2$

11.1. Equazioni di stato.

135 Capitolo XII  
I clatrati negli studi delle inclusioni fluide

12.1. Chimica e struttura dei clatrati. 12.2. Tipologia del sistema  $H_2O-CO_2$ . 12.3. Tipologia del sistema  $H_2O-CH_4$ . 12.4. Tipologia del sistema  $H_2O-CO_2-NaCl$ . 12.5. I clatrati nelle inclusioni fluide.

145 Capitolo XIII  
La spettroscopia Raman nello studio delle inclusioni fluide

13.1. Principi di base. 13.2. Questioni analitiche. 13.3. Fonti di informazioni della spettroscopia Raman. 13.4. Strumentazione. 13.5. Principi base per l'interpretazione quantitativa. 13.6. Proprietà fisiche da spettri Raman. 13.7. Conclusioni e prospettive.

153 Capitolo XIV  
Analisi delle inclusioni fluide con LA-ICP-MS

14.1. Concetti base. 14.2. Analisi di inclusioni fluide tramite LA-ICP-MS. 14.3. Strumentazione. 14.4. Tecnica e metodologia. 14.5. Metodi di calibrazione. 14.6. Riduzione e analisi dei dati. 14.7. Precisione e accuratezza del metodo. 14.8. Conclusioni.

165 Capitolo XV  
Analisi delle inclusioni silicatiche (melts)

15.1. SEM/BSE/EDS/WDS. 15.2. Microsonda Elettronica (EMP). 15.3. Microsonda Ionica (SIMS). 15.4. Laser Ablation (ICPMS). 15.5. Spettroscopia Raman. 15.6. Altri metodi analitici.



- 171 Capitolo XVI  
Software per l'interpretazione di dati microtermometrici delle inclusioni fluide
- 16.1. Pacchetto CLATHRATES. 16.2. Esempi del pacchetto CLATHRATES. 16.3. Pacchetto FLUIDS. 16.4. Esempi del pacchetto FLUIDS. 16.4. MacFlinCor.
- 187 Capitolo XVII  
Le inclusioni fluide nello studio degli ambienti sedimentari e diagenetici
- 17.1. I più importanti sistemi di fluidi in ambienti sedimentari e diagenetici. 17.2. Due problemi relativi alle rocce di basse temperature: metastabilità e stretching. 17.3. I tre stadi di uno studio di inclusioni fluide: descrizione, analisi e interpretazione.
- 197 Capitolo XVIII  
Le inclusioni fluide come strumento per la ricostruzione strutturale della migrazione dei paleofluidi
- 18.1. Principi. 18.2. Aspetti pratici dello studio dei FIP. 18.3. Caratterizzazione dei fluidi nei FIP. 18.4. Conclusioni
- 203 Capitolo XIX  
I fluidi nel mantello: evidenza delle inclusioni fluide
- 19.1. Presenza di CO<sub>2</sub> nel mantello attraverso la densità delle inclusioni fluide. 19.2. Inclusioni carbonatiche e inclusioni fluide carbonato-CO<sub>2</sub>. 19.3. Inclusioni fluide di H<sub>2</sub>O nel mantello. 19.4. CO<sub>2</sub> e brine nel mantello, uno o due fluidi?
- 211 Capitolo XX  
Inclusioni fluide e vetrose in ambiente subvulcanico: esempi nell'area napoletana e nelle Isole Pontine (Italia)
- 20.1. Retrospectiva. 20.2. Campi Flegrei. 20.3. Monte Somma-Vesuvio. 20.4. Ventotene. 20.5. Ponza. 20.6. Conclusioni.
- 229 Capitolo XXI  
Glossario dei termini e dei simboli usati nello studio delle inclusioni fluide



## Prefazione

Considerata l'attenzione e l'interesse sempre più in crescita verso l'utilizzo delle inclusioni fluide e vetrose da parte di petrologi, mineralogisti, geochimici, gemmologi e studiosi in generale delle Scienze della Terra, fino ormai anche a settori che si avvicinano alla biologia come la geomicrobiologia, gli Autori hanno pensato di condensare in questo volume gli argomenti concettuali basilari, facendo una sintesi capitolo per capitolo di articoli pubblicati in riviste e testi internazionali e fornendone una versione tradotta in italiano per facilitare agli esordi gli studenti interessati. A questo è stato aggiunto solo un caso-studio, sull'applicazione dello studio delle inclusioni fluide e vetrose in ambiente subvulcanico, con il particolare esempio dell'area napoletana e delle Isole Pontine, proprio al fine di evidenziare le potenzialità di questo tipo di indagine.

Sotto ogni titolo di capitolo è riportato l'Autore della fonte originaria da cui è stata tratta la traduzione ragionata, con una sintesi degli aspetti più importanti ai fini didattici, e il riferimento completo per esteso in bibliografia.

I primi otto capitoli del volume si concentrano sulle inclusioni fluide, sulle loro proprietà fisiche e chimiche, sulle relazioni di fase dei vari sistemi e sulla metodologia di indagine e nomenclatura utilizzata per il loro studio. In particolare, il capitolo 1 è tratto da un articolo pubblicato da Robert Bodnar nel 2005, in cui si descrive l'importanza dei fluidi nei sistemi planetari, la loro distribuzione e il loro effetto su fenomeni naturali quali il vulcanismo e la formazione dei giacimenti minerali. Il capitolo 2 è tratto da un articolo pubblicato su *Le Scienze* da Benedetto De Vivo nel 1984 e introduce alcuni concetti fondamentali, quali i meccanismi di formazione delle inclusioni fluide nei minerali, la differenza fra temperatura di intrappolamento e temperatura di omogeneizzazione, la determinazione di pressione e salinità. Il capitolo 3, tratto da un articolo di Robert Bodnar del 2003, affronta invece il tema del Fluid Inclusion Assemblage (FIA) e la riequilibrio delle inclusioni fluide. Nel capitolo 4, seguendo la procedura descritta da Robert Goldstein nel 2003, si tratta il tema di selezione delle inclusioni fluide, delle diverse fasi di preparazione dei campioni e dell'osservazione al microscopio e analisi con microscopia ottica. Il capitolo 5, tratto da un articolo di Harvey Belkin del 1994, tratta temi riguardanti le indagini microtermometriche utilizzate per lo studio delle inclusioni fluide, quali la descrizione dei tavolini riscaldanti/congelanti, la procedura e i materiali utilizzati per la loro calibrazione e in generale le diverse fasi che si susseguono durante un esperimento microtermometrico. Nel capitolo 6, tratto da un articolo di Larry Diamond e Robert Bodnar del 2003, sono descritti i concetti fondamentali, la terminologia e il metodo per interpretare le relazioni di fase delle inclusioni fluide nei sistemi H<sub>2</sub>O pura, H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>, e i sistemi salini H<sub>2</sub>O-NaCl, H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl, H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>. Il capitolo 7, basato su un articolo di Edwin Roedder del 1984, si concentra sul tema della metastabilità delle inclusioni fluide e fornisce al lettore gli strumenti per riconoscerne il grado e valutarne correttamente i dati microtermometrici. Il capitolo 8, tratto da un articolo di Robert Bodnar del 2003, descrive in dettaglio il fenomeno della riequilibrio delle inclusioni fluide e vetrose.

Il capitolo 9, basato su un articolo pubblicato da Claudia Cannatelli e collaboratori nel 2015, descrive in dettaglio le inclusioni vetrose (melt inclusions), i primi approcci scientifici, le indagini petrografiche, i meccanismi di formazione, la procedura utilizzata per studiarle, dalla selezione di Melt Inclusions Assemblages (MIA) alle indagini microtermometriche.

Nei capitoli 10, 11 e 12, tratti da articoli di Larry Diamond del 2003, Jean Dubessy e Régis Thiéry nel 1994, Ronald Bakker e Régis Thiéry nel 1994, sono descritte le relazioni di fase del sistema H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> e dei clatrati rispettivamente, i comportamenti delle inclusioni fluide in questi sistemi durante il riscaldamento e il raffreddamento, e in generale la procedura per stimare le loro proprietà PVTX.

I capitoli 13, 14, 15 e 16 descrivono in dettaglio le tecniche analitiche utilizzate per lo studio delle inclusioni fluide e vetrose (basati su articoli di Robert Burrus del 2003, Maria Luce Frezzotti e collab-

oratori del 2012, Joel Gagnon e collaboratori 2003, Claudia Cannatelli e collaboratori del 2015, rispettivamente) e i principali software utilizzati per l'interpretazione delle misure microtermometriche (Ronald Bakker e Philip Brown del 2003).

Nei capitoli 17, 18 e 19 sono descritte le principali applicazioni della tecnica delle inclusioni fluide nello studio degli ambienti sedimentari e diagenetici (basato su un articolo di Jacques Touret del 1994), nella ricostruzione strutturale della migrazione dei paleofluidi (tratto da un articolo di Michel Cathelineau e collaboratori del 1994 e da un lavoro di Marc Lespinasse del 1999), e nello studio delle caratteristiche del mantello terrestre (basato su un articolo di Maria Luce Frezzotti e Jacques Touret del 2014).

Il capitolo 20, basato su articoli di Benedetto de Vivo e collaboratori del 2006 e 2009, si concentra sull'applicazione della tecnica delle inclusioni fluide e vetrose in sistemi vulcanici, con il particolare esempio dell'area napoletana e delle Isole Pontine.

Per finire, il capitolo 21 è basato su un articolo di Larryn Diamond del 2003 e contiene un glossario dei principali termini e simboli contenuti in questo volume e che sono utilizzati nello studio delle inclusioni fluide e vetrose.

L'acqua è la risorsa più preziosa della Terra, più dei diamanti, più dell'oro o del petrolio, più di qualsiasi altra risorsa prodotta o utilizzata dall'uomo; ed è preziosa non tanto per il suo valore monetario quanto perché l'uomo non può vivere senza.

Oltre alla sua importanza per l'umanità in genere, l'acqua ha anche un importante significato per gli scienziati della Terra. Per loro, il termine "acqua" viene usato genericamente per descrivere la fase fluida a bassa viscosità che è associata ai numerosi processi geologici, anche quando contiene disciolti o sali o altri componenti volatili come i gas CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> e S.

Nella Terra e nei sistemi planetari l'acqua si presenta sotto diverse forme e quantità. A livelli più superficiali sotto forma di pioggia, fiumi, laghi, oceani, acque sotterranee. La maggior parte si trova come acqua relativamente pura, con contenuti di sali fino a 32.000 ppm (3.2 % in peso) (es. l'acqua del mare); con l'aumentare della profondità l'acqua diventa più calda e più salina fino a contenere 30-40 TDS (Total Dissolved Salts = Sali Totali Disciolti) nei bacini continentali profondi. Queste salamoie dei bacini sono strettamente associate alla generazione, migrazione e intrappolamento di depositi di idrocarburi e possono inoltre dar luogo alla formazione di importanti depositi di Zn-Pb-Cu.

Nella storia della Terra numerosi sono i processi che sono serviti e servono a trasferire l'acqua da un ambiente a un altro. Ad esempio il vulcanismo è l'attività principale per cui l'acqua e altri volatili vengono trasferiti dall'interno della Terra verso la superficie e verso l'atmosfera; le loro proporzioni dipendono dal tipo di vulcanismo e dalla composizione del magma. È inoltre da ricordare che le quantità di CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> prodotte dalle risorse antropogeniche sono di 3 ordini di grandezza maggiori rispetto all'insieme delle risorse vulcaniche sia sottomarine che subaeree.

Mentre il vulcanismo trasferisce i volatili dalle profondità agli ambienti più superficiali, tramite le zone di subduzione, l'acqua e gli altri componenti vengono trasferiti dalla superficie verso l'interno della Terra. Le quantità di H<sub>2</sub>O e di CO<sub>2</sub> che vengono subdotte ogni anno sono state stimate dai 8.7 ai 2.2 x 10<sup>11</sup> kg rispettivamente, anche se in tutti i fenomeni relativi alla subduzione una certa quantità di fluidi viene comunque persa e/o coinvolta in altri processi (es. formazione di filoni, idratazione di minerali etc.). Quindi, parte dei volatili contenuti negli *slab* in subduzione sono riportati in superficie dall'attività vulcanica ad essi connessi, mentre il resto viene trasportato nel mantello, il quale di per sé già contiene acqua juvenile che non faceva parte dell'idrosfera terrestre (Bodnar et al., 2013). Per molti se non tutti i processi e gli ambienti geologici, la distribuzione e il ruolo dell'acqua sono fattori importanti.

### **1.1 I fluidi nei giacimenti minerari**

I giacimenti minerari si formano per processi geologici che vanno dall'alterazione atmosferica alla cristallizzazione magmatica, ma per lo più si formano ad opera di fluidi caldi, che trasferiscono massa e energia termica nella crosta (Kesler, 2005). I fluidi idrotermali responsabili della maggior parte dei giacimenti minerari della Terra sono costituiti essenzialmente da H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e NaCl; sono prevalentemente mossi da differenze di temperatura, quota o densità. I fluidi magmatici hanno le temperature più elevate (~ 600°C); i fluidi bacinali e le acque meteoriche le più basse (~ 100°C). Le salinità, molto maggiori di quelle marine, sono dovute a fenomeni di ebollizione, evaporazione e dissoluzione delle evaporiti per lo più nei sistemi magmatici e bacinali.

Attualmente le ricerche si concentrano sullo stabilire le concentrazioni dei metalli in questi fluidi, sul volume e la durata del flusso idrotermale e sulle relazioni tra i giacimenti e i fluidi a scala regionale.

## 1.2 I volatili nei sistemi magmatici e vulcanici

Nei sistemi magmatici e vulcanici i volatili più abbondanti ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , S e Cl) svolgono un ruolo molto importante nella generazione, evoluzione e tipo di eruzione dei magmi (Giggenbach, 1995). L'abbondanza e il flusso di questi volatili sono importanti per la comprensione dei rischi associati alle manifestazioni vulcaniche esplosive, in quanto la separazione di una fase ricca in volatili e la sua conseguente espansione, controlla l'esplosività del magma (De Vivo et al., 2005). I minerali che cristallizzano dai magmi possono intrappolare piccoli campioni del magma stesso sotto forma di inclusioni silicatiche e fluide, uniche testimonianze del contenuto in volatili del magma prima dell'eruzione. Gli studi e le nuove tecniche analitiche delle inclusioni silicatiche e fluide permettono oggi non solo di identificare ma anche determinare i volatili nei magmi, e di capire il flusso dei volatili dalle eruzioni magmatiche e quindi la loro evoluzione.

## 1.3 L'acqua nel mantello

Il trasporto dell'acqua dalla superficie nel profondo interno della Terra e la sua circolazione a scala globale sono punti chiave importanti per capire l'evoluzione del nostro pianeta. Poiché le stime della quantità di acqua trasportata dagli *slab* in subduzione più l'acqua immagazzinata dai livelli peridotitici degli *slab*, superano le stime della quantità di acqua degassata dal mantello attraverso il magmatismo di archi e dorsali medio-oceaniche, ne consegue che una certa quantità di acqua può essere trasportata nel mantello profondo da una circolazione globale profonda di acqua. Parte di questa perdita di acqua può anche essere dovuta all'idratazione di porzioni (*wedges*) di mantello sovrastanti gli *slabs* (Ohtani et al., 2005). La quantità e la circolazione dell'acqua globale sono oggetto di studi e discussione anche perché l' $H_2O$  o l' $H_2$  cambiano le proprietà fisiche del mantello, ad esempio la temperatura di fusione, la viscosità e la velocità di diffusione, e influenzano la convezione nel mantello e la dinamica dei *plumes* ascendenti. Si è visto che il mantello superiore e inferiore hanno una capacità di immagazzinare acqua inferiore a quella della zona di transizione. Bodnar et al. (2013) riportano che la quantità di acqua nella zona di transizione dipende molto dal grado di saturazione delle fasi presenti, e indicano il valore di 2000 ppm di  $H_2O$  per contenuto medio di acqua della zona di transizione.

## 1.4 Fluidi, faglie e flusso

I fluidi geologici incidono sulla deformazione delle rocce sia da un punto di vista fisico che chimico. Inoltre, almeno nel caso dell'acqua, i componenti dei fluidi possono avere effetti significativi anche se presenti in concentrazioni talmente basse da far sì che nessun fluido ne sia privo (Green e Jung, 2005). A seconda del livello di stress, i fluidi possono originare faglie (quindi terremoti nel caso di stress più elevati), segregarsi sui bordi dei minerali (*grain boundaries*) (nel caso di stress più bassi); oppure possono aumentare il flusso e dar luogo a differenziazione chimica.

## 1.5 L'acqua extraterrestre

Che la presenza di acqua liquida sia rara nel sistema solare o che la Terra sia il solo luogo dove è o è stata presente, si è rivelata un'illusione. Infatti il ghiaccio è stato presente nell'intero sistema solare e si è sciolto in diversi ambienti non solo in un lontano passato. Gli scienziati sono complessivamente certi che qualsiasi forma di vita extraterrestre richieda acqua per svilupparsi e sopravvivere (Zolensky, 2005). Per questo i segnali di vita extraterrestre primitiva si cercano in quei siti dove c'è o c'è stata acqua liquida. Nel modello standard di condensazione il sistema solare si è

formato oltre 4.6 miliardi di anni fa da un'enorme nebulosa di gas in cui era sospesa una significativa quantità di polvere (Cameron, 2001). La nebulosa ha collassato sotto la sua stessa gravità, ha cominciato a ruotare, a causa degli effetti centrifughi si è appiattita nelle parti più esterne mentre il nucleo ha formato il proto-sole. Quando ha smesso di ruotare, la nebulosa ha cominciato a raffreddarsi nonostante il nucleo che formava il sole fosse rimasto caldo. Per il forte gradiente di temperatura, i materiali delle rocce hanno cominciato a condensarsi e, a causa delle elevate concentrazioni di idrogeno e ossigeno, la nebulosa solare conteneva una quantità significativa di acqua, ma solo all'interno dell'orbita di Giove a circa 5 Unità Astronomiche (UA è la distanza tra il sole e la terra) la temperatura era sufficientemente fredda per permettere all'acqua di formare ghiaccio (Petaev e Wood, 2001). La parte interna (~5 UA) della nebulosa è riuscita a spazzare via il vapore acqueo in  $10^5$  anni e da allora l'unica fonte di acqua nel sistema solare interno è stato il movimento delle comete, degli asteroidi idrati, e la polvere da essi derivata

L'unica opportunità di studiare i fluidi asteroidali è stata la scoperta di inclusioni fluide nel salemma di condriti ordinarie e nei carbonati di calcio di condriti carbonacee.

E' dunque evidente che la distribuzione dell'acqua nei vari serbatoi della Terra e il trasferimento tra di essi sia oggi concettualmente compreso ma ancora non quantitativamente. Altrettanto non si può dire per gli altri corpi nel sistema solare, e infatti lo studio dell'acqua negli ambienti extraterrestri è attualmente oggetto di numerose ricerche.

### **Bibliografia**

- Bodnar R. J., 2005. Fluids in planetary systems. *Elements*, 1, 1, 9-12.
- Bodnar, R.J., Azbej T., Becker S.P., Cannatelli, C., Fall A. e Severs M.J., 2013. Whole Earth geohydrologic cycle, from the clouds to the core: The distribution of water in the dynamic Earth system. In: Bickford, M.E., Ed., *The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions: Geol. Soc. of Am. Special Paper 500*, 431–461.
- Cameron A.G.V., 2001. From interstellar gas to the Earth-Moon system. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, 9-22.
- De Vivo B., Lima A. e Webster J.D., 2005. Volatiles in magmatic-volcanic systems. *Elements*, 1, 1, 19-25.
- Kesler S., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*. 1, 1, 13-18.
- Giggenbach W.F., 1995. Composition of magmatic components in hydrothermal fluids. In: Thompson (ed). *Magma, fluids and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, 247-261.
- Green H. e Jung H., 2005. Fluids, faulting and flow. *Elements*, 1, 1, 31-37.
- Ohtani E., 2005. Water in the mantle. *Elements*, 1, 1, 25-30.
- Ohtani E., Hiroo N., Kondo T., Ito M., e Kikegawa T., 2005. Iron-water reaction at high pressure and temperature, and hydrogen transport into the core. *Physics and chemistry of minerals*, 32, 1, 77-82.
- Petaev M.I. e Wood J.A., 2001. Condensation in fractionated nebular systems. II. Formation of enstatite chondrites in dust enriched nebular reservoirs. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, A162.
- Zolensky M. E., 2005. Extraterrestrial water. *Elements*, 1, 1, 39-43.