



L'IMPORTANZA DEI DIAMANTI IN GEOLOGIA

di Fabrizio Nestola*

Il diamante è uno degli 'oggetti' più studiati in geologia. Nonostante la sua estrema rarità, inserendo il termine «diamante» in uno dei più importanti database di pubblicazioni scientifiche (Web of Science), si può verificare che tale termine compare in ben 15 mila pubblicazioni nell'ambito delle discipline geologiche. Ma perché il diamante è così importante e così studiato nonostante la sua estrema rarità? Che ruolo ha questa gemma preziosa nella comprensione dell'evoluzione del nostro Pianeta? Per poter rispondere a tale domanda, si deve considerare in primis che il diamante è l'unico minerale capace di 'viaggiare' nel tempo e nello spazio senza subire trasformazioni dalle grandi pressioni e temperature che incontra durante i suoi 'spostamenti'. In sostanza, il diamante viene utilizzato dai geologi in quanto è l'unico minerale capace di catturare al suo interno veri e propri frammenti di minerali e rocce a grandissime profondità nella Terra (fino a circa 1000 km) trasportandoli successivamente in superficie, dove possono essere studiati in modo diretto dai ricercatori.

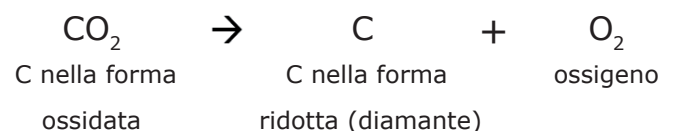
Se alla formidabile capacità di resistenza all'ambiente estremo circostante (tra i 130 e i 1000 km di profondità, dove la temperatura varia tra i 900 e i 2000 °C) e a quella di catturare minerali e rocce nella Terra profonda, aggiungiamo anche l'evidenza che i diamanti mostrano età variabili tra i 3.5 miliardi di anni (la Terra è nata 4.56 miliardi di anni fa) e i 200 milioni di anni fa, allora risulta

evidente che lo studio di questi straordinari minerali (e dei minerali e rocce che troviamo al loro interno) fornisce informazioni preziose e inaccessibili in nessun altro modo su 'cosa' vi sia e 'cosa' sia successo nel tempo all'interno del nostro Pianeta.

Come si formano i diamanti?

Al contrario di quello che si crede, i diamanti naturali nel mantello terrestre non si formano dalla trasformazione diretta della grafite. Tale trasformazione richiederebbe troppa energia di trasformazione e normalmente la natura cerca percorsi a minor consumo energetico. E allora, come si forma un diamante?

La comunità scientifica internazionale completamente unanime ha ormai accettato (e verificato scientificamente in laboratorio) che il diamante si forma a partire da un fluido ricco in carbonio (C) - ossigeno (O) - idrogeno (H) che interagisce con le rocce del mantello (vedi DAY et al., 2023). Nel dettaglio, quando i fluidi C-O-H s'infiltrano nelle rocce del mantello in presenza di condizioni di pressione e temperatura ottimali (non inferiori ad esempio 4-5 GPa e 800-900 °C), se l'ambiente non è 'troppo' ossidante, allora si verifica una reazione di riduzione che può essere scritta come segue:



La reazione mostra chiaramente che la formazione del diamante è fortemente dipendente dallo stato di ossidazione dell'ambiente di formazione e quindi, come detto, abbiamo bisogno che la fugacità d'ossigeno sia relativamente bassa (la fugacità d'ossigeno, indicata con il simbolo f_{O_2} , per semplicità può essere definita come la 'quantità di ossigeno presente in un ambiente geologico').

Ma i fluidi C-O-H di cui si è parlato pocanzi con quali rocce interagiscono nel mantello? Le due principali rocce mantelliche nelle quali si rinvencono i diamanti sono chiamate *peridotiti* ed *eclogiti*.

Le peridotiti sono le rocce più abbondanti del mantello. Sono rocce magmatiche intrusive e sono principalmente costituite da tre minerali chiamati olivina, clinopirosseno e ortopirosseno (vedi più avanti per la definizione chimica di queste tre fasi mineralogiche). Possono essere presenti in queste rocce altri minerali (anche importanti), ma i tre minerali menzionati sono quelli utilizzati a livello internazionale per la classificazione delle peridotiti. Queste rocce presentano granuli normalmente di grandi dimensioni (Fig. 1); la loro composizione chimica è normalmente caratterizzata da SiO_2 , MgO e FeO che assieme costituiscono almeno il 95% dei componenti (vengono dette ultrabasiche perché la SiO_2 totale nella roccia è inferiore al 45%). Diamanti rinvenuti in rocce peridotitiche vengono definiti 'diamanti peridotitici'.

Le eclogiti (Fig. 2) sono rocce metamorfiche principalmente costituite da due minerali: il granato e l'onfacite (si veda più avanti per la definizione chimica di tali minerali). Anche nel caso delle eclogiti, si possono rinvenire altri minerali, ma la loro



Figura 1 - Tipica roccia peridotitica a grana grossolana (i singoli granuli sono di dimensioni elevate) principalmente costituita da olivina, clinopirosseno e ortopirosseno [foto gentilmente resa disponibile dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova; progetto Digital Collection Geoscienze].



Figura 2 - Tipica roccia eclogitica costituita da granato (colore marrone-arancione) e onfacite (granuli di colore verde) [foto gentilmente resa disponibile dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova; progetto Digital Collection Geoscienze].

importanza è molto limitata rispetto ai due minerali principali. Le eclogiti sono caratteristiche di ambienti geologici molto specifici normalmente caratterizzati da alta pressione (non inferiore a 1.2-1.3 GPa) e temperature da medie ad alte (normalmente > 600 °C). La composizione chimica di un'eclogite rispetto ad una peridotite è caratterizzata da un maggior contenuto in SiO_2 ($45\% < SiO_2 < 52\%$, si tratta di rocce basiche), un maggiore tenore in FeO , un minor tenore in MgO e sono presenti in quantità notevoli Al_2O_3 e CaO . Questi cinque

ossidi costituiscono normalmente più del 95% della composizione delle eclogiti. I diamanti rinvenuti nelle eclogiti vengono definiti 'diamanti eclogitici'.

I diamanti litosferici

Circa il 99% dei diamanti studiati sino ad ora vengono classificati come diamanti litosferici (STACHEL e HARRIS, 2008). Si tratta di diamanti che si formano a profondità comprese tra circa 120/130 km fino a non oltre i 200/210 km; la maggior parte dei diamanti litosferici tuttavia sembrerebbe formarsi a circa 175 ± 15 km di profondità (NIMIS et al., 2020) con una temperatura media vicina a 1100-1150 °C (PASQUALETTO et al., 2022) con una finestra di temperature minime-massime comprese tra i 900 e i 1400 °C (STACHEL e HARRIS, 2008). Dal punto di vista morfologico, i diamanti litosferici mostrano morfologie molto regolari spesso presentandosi con la morfologia ottaedrica (Fig. 3). Un'ulteriore caratteristica tipica di tali diamanti è la presenza di azoto come impurezza presente nella struttura cristallina del diamante (DAY et al., 2023) che può addirittura raggiungere 4000 parti per milione. Tuttavia, la caratteristica probabilmente più peculiare dei diamanti litosferici è la presenza di inclusioni mineralogiche tipiche del mantello superiore terrestre e che sono stabili fino a 410 km di profondità circa. Tra queste, in ordine di abbondanza (dalla più abbondante), le più comuni sono le seguenti:

- granato $[(Mg,Fe,Ca)_3(Al,Cr)_2Si_3O_{12}]$
- olivina $[(Mg,Fe)_2SiO_4]$
- magnesiocromite $[(Mg,Fe)(Cr,Fe,Al)_2O_4]$
- solfuri [pirrotina $\sim FeS$, pentlandite $(Fe,Ni)_9S_8$, calcopirite $CuFeS_2$]
- diopside $[\sim CaMgSi_2O_6]$



Figura 3 - Tipici diamanti litosferici con morfologie ottaedriche e inclusioni incolori di olivina [foto: Matteo Chinellato].

- onfacite $[\sim (Ca,Na)(Mg,Al)Si_2O_6]$
- ortopirosseno $[(Mg,Fe,Ca)_2Si_2O_6]$
- coesite (SiO_2)

Proprio grazie a questi minerali rinvenuti all'interno dei diamanti litosferici è possibile oggi comprendere e calcolare a che profondità all'interno della Terra essi si formano. Nel dettaglio, i metodi per il calcolo della pressione e temperatura di formazione vengono detti 'geotermobarometrici' e ne esistono di diverse tipologie anche basati su approcci molto diversi tra loro. Per una lettura molto approfondita sulle metodologie scientifiche utilizzate per determinare pressione e temperatura di formazione del diamante si rimanda a NIMIS (2022) e ANGEL et al. (2022).

I diamanti super profondi

I diamanti super profondi sono quei diamanti che si formano da non meno di 300 km fino almeno a circa 800 km di profondità (ad oggi non è ancora noto se vi sia un reale limite inferiore di profondità nel mantello oltre il quale il diamante non può più formarsi, si veda NESTOLA et al., 2018). I diamanti super profondi rappresentano solo l'1% o al massimo il 2% (STACHEL e HARRIS, 2008) di tutti i diamanti e quindi possiamo

definirli come i diamanti più rari in assoluto. Possono essere facilmente riconosciuti rispetto ai diamanti litosferici in quanto non possiedono morfologie regolari (Fig. 4), non presentano normalmente impurità di azoto (o ne presentano in quantità molto limitate) e sono caratterizzati dalla presenza di inclusioni molto specifiche che possono essere qui di seguito elencate in ordine di abbondanza (dalla più abbondante):

- ferropericlasio [(Mg,Fe)O]
- granato majoritico [(Mg,Fe,Ca)₃(Al,Cr)₂Si₃O₁₂]
- breyite [CaSiO₃]
- enstatite a basso contenuto di nickel [MgSiO₃]
- larnite [Ca₂SiO₄]
- titanite [CaSi₂O₅]



Figura 4 - Tipici diamanti super profondi con morfologie irregolari [foto: Robert Weldon/GIA; Gem Diamonds Ltd.].

Altre inclusioni rinvenute nei diamanti super profondi molto rare ma estremamente significative sono certamente la jeffbenite [(Mg,Fe,Ca)₃(Al,Cr,Ti)₂Si₃O₁₂] (NESTOLA et al., 2023) e la ringwoodite [(Mg,Fe)₂SiO₄]. In particolare, quest'ultima fase (polimorfo di alta pressione dell'abbondante fase

presente nei diamanti litosferici, olivina) indicherebbe che la zona di transizione del nostro Pianeta (quel settore compreso tra i 410 e i 660 km di profondità) sarebbe caratterizzata da un contenuto in H₂O confrontabile con tre volte l'acqua contenuta nell'Oceano Pacifico (PEARSON et al., 2014).

Così come nei diamanti litosferici, anche nei diamanti super profondi la loro temperatura e pressione di formazione si può ottenere dallo studio delle inclusioni. In alcuni casi, questo è possibile semplicemente utilizzando i dati a disposizione in letteratura sui campi di stabilità di alcuni minerali, in altri casi sono stati sviluppati metodi geotermobarometrici come per i diamanti litosferici (si veda ANGEL et al., 2022). Per esempio, è evidente che se dalle sintesi di laboratorio la ringwoodite si è dimostrata essere stabile a profondità tra i 525 e i 660 km, allora se viene trovata in un diamante si può direttamente applicare tale informazione e fornire il range di profondità appena menzionato anche per la cristallizzazione del diamante che la contiene. In altri casi, metodi geotermobarometrici sono stati applicati recentemente al ferropericlasio (NESTOLA et al., 2023), al granato majoritico (THOMSON et al., 2021, Fig. 5), alla breyite (ANZOLINI et al., 2018 e GENZEL et al., 2023).

Combinando tutti i dati geotermobarometrici sino ad ora raccolti in letteratura, risulta evidente che i diamanti super profondi si formino a grandi profondità, da circa 300 km fino a non meno di 780-800 km. Unendo tale informazione all'analisi isotopica del carbonio costituente i diamanti stessi, è stato possibile comprendere non solo che cosa dobbiamo aspettarci a grandi profondità nel nostro Pianeta ma anche

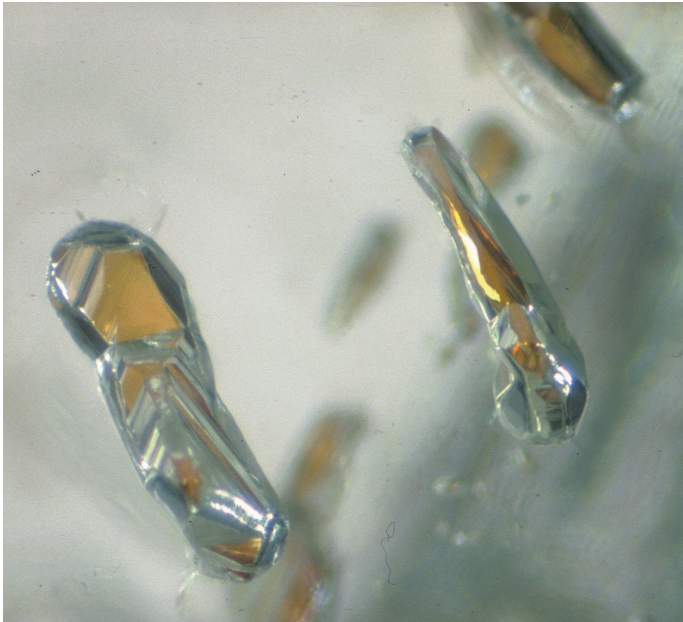


Figura 5 - Diamante super profondo contenente un'inclusione di granato majoritico (inclusioni arancioni). La massima dimensione raggiunta da queste inclusioni è di circa 0.100 mm [foto: J.W. Harris, University of Glasgow].

che spesso il carbonio superficiale lo ritroviamo a formare diamanti super profondi per poi tornare in superficie. Questo conferma una volta per tutte che esiste una forte 'comunicazione' tra la superficie terrestre e le zone più profonde della Terra attraverso il riciclo sia di elementi attesi dagli esperimenti di laboratorio (ferro, magnesio, silicio, ossigeno) sia da quelli più leggeri e meno attesi come appunto il carbonio, l'azoto, l'idrogeno, il boro (quest'ultimo riconosciuto come la principale causa della formazione dei rarissimi diamanti blu, Fig. 6) che spesso sono ritenuti essere abbondanti solo sulla superficie terrestre e che sono gli elementi chiave per la nascita della vita sul nostro Pianeta.

L'età dei diamanti

La datazione dei diamanti è di fondamentale importanza in geologia; allo stesso tempo tuttavia ottenere datazioni sui diamanti è estremamente complesso. I diamanti infatti



Figura 6 - Diamante super profondo di colore blu. Il colore è dato dalle impurezze di boro; il diamante in figura è stato studiato in Smith et al. (2018) ed è una gemma di 3.46 carati con la dimensione maggiore pari a 0.99 cm [foto: Jae Liao, GIA].

non possono essere datati se non attraverso le inclusioni mineralogiche in essi contenute. Si rimanda per una lettura molto approfondita focalizzata sulla datazione del diamante al recente articolo di SMIT et al. (2022). Proprio questo lavoro esteso mette in evidenza come la totalità delle datazioni effettuate sino ad oggi sui diamanti sono relative ai diamanti litosferici, con solo sei datazioni riportate sui diamanti super profondi. In particolare, SMIT et al. (2022) riportano per i diamanti litosferici oltre 300 datazioni utilizzando i sistemi renio-osmio (Re-Os; elementi chimici molto rari) nei solfuri di ferro e samario-neodimio (Sm-Nd; anche questi elementi molto rari in natura) nei silicati, raccogliendo tutti i dati messi a disposizione dal 1986 ad oggi.

I dati indicano che i diamanti litosferici si sono formati a partire da 3.52 miliardi di anni fa (con un'incertezza di appena 17 milioni di anni) e fino a 212 milioni di anni fa (con un'incertezza pari a 19 milioni di anni).

Questo è un dato davvero significativo perché indica che le informazioni ricavate grazie ai diamanti e alle loro inclusioni possono essere utilizzate per ottenere l'evoluzione del nostro Pianeta per gran parte della sua storia evolutiva. L'analisi delle datazioni in SMIT et al. (2022) evidenzia che, in media, i diamanti eclogitici sono più giovani di quelli peridotitici di almeno mezzo miliardo di anni.

Purtroppo però tutti i risultati di datazione sui diamanti litosferici possono essere utilizzati solo per comprendere l'evoluzione geologica della Terra fino ad un massimo di profondità non superiore a 200-210 km (limite di formazione dei diamanti litosferici). Infatti, al momento si hanno dati di età sui diamanti super profondi solo in sei casi. Questo è dovuto al fatto che inclusioni in diamanti super profondi contenenti sufficienti quantità degli elementi utilizzati per la datazione (Sm, Nd, U, Pb, Re e Os) sono estremamente rari e spesso le inclusioni sono molto piccole.

Ad oggi, abbiamo solo quattro datazioni Re-Os e due datazioni U-Pb disponibili. Queste sei datazioni indicano età più giovani di 1 miliardo di anni. Tuttavia, a causa del numero così limitato di dati risulta inutile provare a fornire spiegazioni scientifiche sulle ragioni di tali differenze, così significative rispetto ai diamanti litosferici. Ci si augura che in futuro, nonostante l'estrema rarità dei diamanti super profondi, si possa arrivare ad ottenere dati da almeno un centinaio di datazioni.

Conclusioni

I diamanti si stanno rivelando in geologia tra i più importanti campioni naturali per la comprensione del sistema Terra a grandi

profondità. Non vi è alcun metodo alternativo ad oggi noto per studiare il nostro Pianeta a profondità che raggiungono addirittura i 1000 km, se non attraverso queste gemme preziose. Allo stesso tempo i diamanti, grazie alle loro età di formazione fortemente variabili tra 3.5 miliardi e 200 milioni di anni fa, ci permettono non solo di ottenere informazioni sulla tipologia di rocce e minerali presenti a grandi profondità ma anche di capire come la Terra si sia evoluta nel tempo. Non da ultimo, i diamanti hanno dimostrato che tra la superficie terrestre e le più grandi profondità all'interno del mantello esiste una forte interazione con riciclo di elementi chimici (anche di quelli che stanno alla base della vita) grazie ai processi di subduzione delle placche tettoniche (Fig. 7) che rendono il nostro Pianeta unico rispetto agli altri pianeti del Sistema solare.

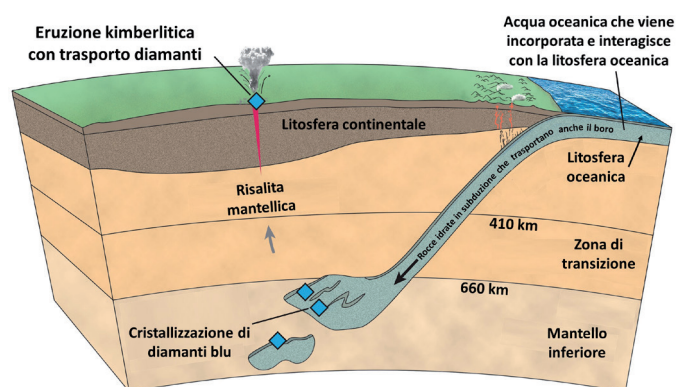


Figura 7 - Sezione schematica della Terra fino al mantello terrestre inferiore che mostra una placca tettonica che va in subduzione. Si possono osservare i settori in cui diamanti (in questo caso i diamanti blu) potrebbero formarsi e come il boro (l'elemento chimico che causa la colorazione blu dei diamanti) venga catturato dalle rocce superficiali a spese delle sorgenti oceaniche per poi essere trasportati fino al mantello inferiore (disegno: Evan Smith).

Bibliografia

P. NIMIS - R. PRESTON - S.H. PERRITT - I.L. CHINN, *Diamond's depth distribution systematics*, «Lithos», 376-377 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105729>.

- T. STACHEL - J.W. HARRIS, *The origin of cratonic diamonds – Constraints from mineral inclusions*, «Ore Geology Reviews», 34 (2008), pp. 5-32. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.05.002>.
- L. PASQUALETTO - F. NESTOLA - D.E. JACOB, M.G. PAMATO - B. OLIVEIRA - S. PERRITT - I. CHINN - P. NIMIS - S. MILANI - J.W. HARRIS, *Protogenetic clinopyroxene inclusions in diamond and Nd diffusion modeling - Implications for diamond dating*, «Geology», 50 (2022), pp. 1038-1042, <https://doi.org/10.1130/G50273.1>.
- M.C. DAY - M.G. PAMATO - D. NOVELLA - F. NESTOLA, *Imperfections in natural diamond: the key to understanding diamond genesis and the mantle*, «La Rivista del Nuovo Cimento», (2023). <https://doi.org/10.1007/s40766-023-00045-6>.
- P. NIMIS, *Pressure and temperature data for diamonds*, «Reviews in Mineralogy and Geochemistry», 88 (2022), pp. 533-566. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.10>.
- R.J. ANGEL - M. ALVARO - F. NESTOLA, *Crystallographic methods for non-destructive characterization of mineral inclusions in diamonds*, «Reviews in Mineralogy and Geochemistry», 88 (2022), pp. 257-306. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.05>.
- F. NESTOLA - N. KOROLEV - M. KOPYLOVA - N. ROTIROTI - D.G. PEARSON - M.G. PAMATO - M. ALVARO - L. PERUZZO - J.J. GURNEY - A.E. MOORE - J. DAVIDSON, *CaSiO₃ perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle*, «Nature», 555 (2018), pp. 237-241. <https://doi.org/10.1038/nature25972>.
- F. NESTOLA - M. PRENCIPE - D. BELMONTE, *Mg₃Al₂Si₃O₁₂ jeffbenite inclusion in super-deep diamonds is thermodynamically stable at very shallow Earth's depths*, «Scientific Reports», 13 (2023), p. 83. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27290-9>.
- D.G. PEARSON - F.E. BRENKER - F. NESTOLA, J. MCNEILL - L. NASDALA - M.T. HUTCHISON, S. MATVEEV - K. MATHER - G. SILVERSMIT - S. SCHMITZ - B. VEKEMANS - L. VINCZE, *Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond*, «Nature», 507 (2014), pp. 221-224. <https://doi.org/10.1038/nature13080>.
- F. NESTOLA - M.G. PAMATO - D. NOVELLA - Y. WANG - K. QU - E.M. SMITH, *Elastic geobarometry yielding a faithful sublithospheric depth for a ferropericlase inclusion in diamond*, «Lithos», 454-455 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107265>.
- A.R. THOMSON - S.C. KOHN - A. PRABHU - M.J. WALTER, *Evaluating the formation pressure of diamond-hosted majoritic garnets: a machine learning majorite barometer*, «Journal of Geophysical Research», 126 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020JB020604>.
- C. ANZOLINI - M. PRENCIPE - M. ALVARO - C. ROMANO - A. VONA - S. LORENZON - E.M. SMITH - F.E. BRENKER - F. NESTOLA, *Depth of formation of super-deep diamonds: Raman barometry of CaSiO₃-walstromite inclusions*, «American Mineralogist», 103 (2018), pp. 69-74. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6184>.
- P.T. GENZEL - M.G. PAMATO - D. NOVELLA - L. SANTELLO - S. LORENZON - S.B. SHIREY - D.G. PEARSON - F. NESTOLA - F.E. BRENKER, *Geobarometric evidence for a LM/TZ origin of*

CaSiO₃ in a sublithospheric diamond, «Geochemical Perspective Letters», 25 (2023), pp. 41-45. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2313>.

E.M. SMITH - S.B. SHIREY - S.H. RICHARDSON - F. NESTOLA - E.S. BULLOCK - J. WANG - W. WANG, *Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle*, «Nature», 560 (2018),

pp.580-584. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0334-5>.

K.V. SMIT - S. TIMMERMAN - S. AULBACH - S.B. SHIREY - S.H. RICHARDSON - D. PHILLIPS - D.G. PEARSON, *Geochronology of diamonds*, «Reviews in Mineralogy and Geochemistry», 88 (2022), pp. 567-636. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.11>.

*Fabrizio Nestola è professore ordinario di Mineralogia nell'Università degli Studi di Padova e socio corrispondente dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti