

CARATTERIZZAZIONE DELLA HYALITE FLUORESCENTE DI SAN LUIS POTOSÍ, MESSICO

Flavio Butini, Giovanni Luca Cattaneo, Nicola Precisvalle, Armida Sodo e Federico Zorzi*

Scopo di questo lavoro, è la caratterizzazione di una nuova varietà di Opale Hyalite messicana con fluorescenza verde alla luce naturale scoperta nello Stato federato di San Luis Potosí. Infatti, nel primo semestre del 2019 è stato scoperto un altro deposito di questo materiale ubicato a circa 250 km SE di distanza dal deposito dello Stato di Zacatecas, il cui ritrovamento risale al 2013. A questo ritrovamento (il primo fu un affioramento superficiale: vedi Figura 1) ha contribuito uno degli autori, assieme ad altri tre ricercatori del Messico centrotrentinale occidentale, dopo tre anni di ricerca mirata.

Classificazione della Hyalite

Nell'ultimo stadio del raffreddamento del magma, la fase idrotermale¹, le soluzioni acquose derivanti dalla condensazione delle bolle gassose contenute in esso, generano la formazione del gel siliceo che andrà ad occupare le piccole cavità (una sorta di vescicole) che precedentemente erano occupate dal gas vulcanico presente nel magma stesso.

È da questo gel siliceo che si forma l'**Opale** ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) amorfo, semiamorfo o microcristallino; non a caso il suo contenuto di acqua oscilla tra il 3% e il 10% del suo peso totale.

La varietà più comune è "Opale-CT" costituita da minuscole sfere microcristalline (150 - 350 nm) impacchettate di Cristobalite (C) e Tridimite (T) entrambi polimorfi (differenti fasi cristalline seppur con identica composizione chimica) SiO_2 .

Il cosiddetto "gioco di colori" (da definirsi più correttamente: iridescenza) è generato dalla diffrazione e dalla interferenza della luce.

Queste sferette sono imballate in una griglia a struttura reticolare e a strati sovrapposti. L'uniformità di questa struttura (associata a una quantomeno minima diversità del diametro delle singole sferette), genera l'iridescenza: oscillando e ruotando l'Opale la luce colpisce le sfere da diverse angolazioni e si percepisce un cambiamento di colori.

Un'altra varietà è l'Opale-A (A: amorfo) caratterizzato dall'assenza di strutture cristalline, ma con due possibili ordinamenti delle molecole di Silice idrata. L'Opale-AG (G: gel) è composto da sfere di Silice idrata regolarmente ordinate ed ha un aspetto colloidale, mentre l'Opale-AN (N: network) è costituita da molecole di Silice idrata che formano una rete continua.



Fig. 1 Affioramento in situ della Hyalite fluorescente di San Luis Potosí. La Hyalite di San Luis Potosí in affioramento, priva di copertura di alterazione dovuta agli agenti esogeni (o anche vegetazionale), non è comune. (Foto: G.L. Cattaneo)

* Flavio Butini – Istituto Gemmologico Nazionale, Roma – info@ignroma.it
Giovanni Luca Cattaneo – Ambar, Roma – ambar@ambarweb.it
Nicola Precisvalle – Università degli Studi di Ferrara – prncnl@unife.it
Armida Sodo – Università degli Studi di Roma Tre – armida.sodo@uniroma3.it
Federico Zorzi – Università degli Studi di Padova – federico.zorzi@unipd.it

¹ Fase idrotermale: ha inizio al di sotto della temperatura critica (374°C) e termina con la deposizione dei sali disciolti.



Fig. 2 Hyalite fluorescente di San Luis Potosí sfaccettata (ct 7,03 - 15 x 14 x 7,5 mm) a luce bianca nell'immagine a sinistra e a luce ultravioletta onde lunghe (365 nm) nell'immagine a destra. (Proprietà e foto: G.L. Cattaneo)

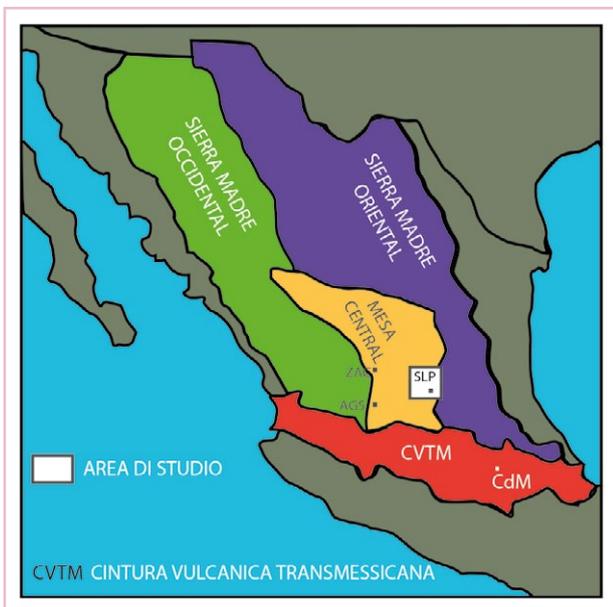


Fig. 3 Inquadramento fisiografico. Da Tristán-González et al., 2009, parz. modificato. SLP: San Luis Potosí. ZAC: Zacatecas. AGS: Aguascalientes. CdM: Città del Messico.



Fig. 4 Localizzazione geografica dello Stato di San Luis Potosí in Messico. (Foto: TUBS/Wikimedia Commons)

L'Opale-AN ha un tipico aspetto vetroso ed è noto anche col termine "Hyalite" (Flörke et al., 1991), in italiano "lialite". Il termine deriva dal greco antico ὑαλος (hyalos) che significa "perfettamente incolore e trasparente". È più nota con la terminologia anglosassone "Hyalite": termine adottato anche da noi.

Ma rispetto alla Hyalite maggiormente diffusa, la caratteristica non comune di questa varietà messicana (come d'altronde per la varietà di Zacatecas), è di possedere una intensa fluorescenza ai raggi ultravioletti [sia onde lunghe (UVA) che alle onde corte (UVC)] (vedi Figura 2), osservabile in alcuni campioni anche a luce naturale.

Riguardo la causa della marcata fluorescenza dell'Opale-AN (Hyalite) di Zacatecas, secondo un lavoro di Fritsch et al., 2015, sarebbe dovuta alla presenza, in tracce, del catione Uranile (UO_2^{2+}).

Inquadramento geografico

Siamo nella Unità fisiografica della Mesa Central, un altopiano con una altitudine media attorno ai 2000 m s.l.m. tra la Sierra Madre Occidentale, la Sierra Madre Orientale e la Cintura Vulcanica Transmessicana (Figura 3). Più in dettaglio, nel cuore della parte meridionale della Provincia vulcanica della Sierra Madre Occidentale, Stato di San Luis Potosí (Figura 4), costituita da una grande distesa complessivamente arida con cespugli spinosi, cactus nopal (l'opuntia fico d'India) e altre piante xerofile (Figura 5).

Inquadramento geologico e assetto tettonico

Il deposito si trova nella parte meridionale della Sierra Madre Occidentale in una tra le più grandi aree vulcaniche



Fig. 5 Piante xerofile lungo il cammino per il deposito.
(Foto: G.L. Cattaneo)

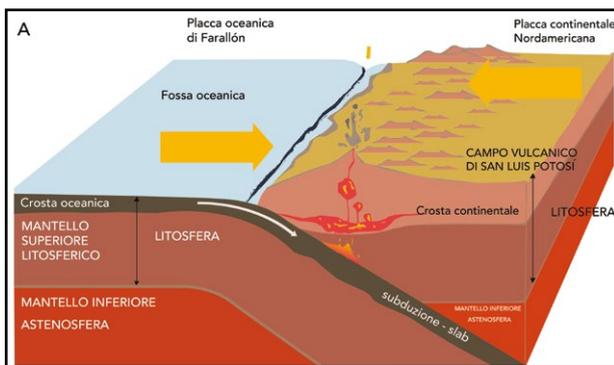


Fig. 6a Subduzione della placca oceanica di Farallón (slab) al di sotto della placca continentale Nordamericana. (Elaborazione grafica: F. Cisana)

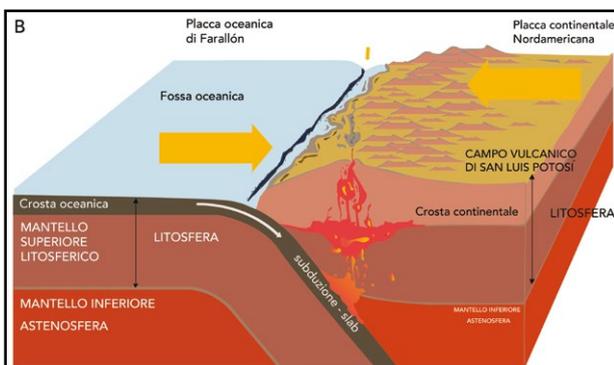


Fig. 6b Aumento dell'angolo d'inclinazione della subduzione dello slab. (Elaborazione grafica: F. Cisana)

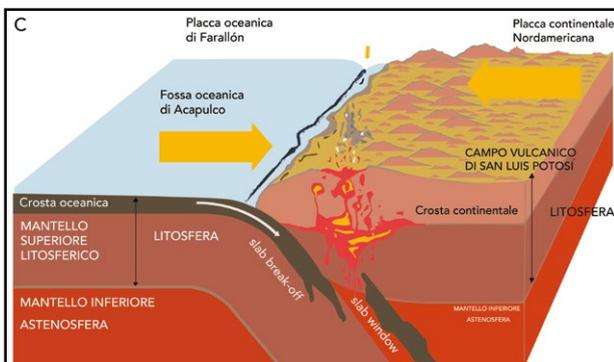


Fig. 6c Rottura definitiva dello slab (slab break-off). (Elaborazione grafica: F. Cisana)

silicee della Terra: la Provincia vulcanica della Sierra Madre Occidentale.

Più in dettaglio, le rocce vulcaniche della parte sudorientale della Mesa Central che costituiscono il **Campo Vulcanico di San Luis Potosí** derivano da una sequenza temporale discontinua di colate di lava (tipica nelle eruzioni effusive: il magma arrivato in superficie, scende lungo i fianchi del vulcano) e di ignimbriti piroclastiche (tipica di eruzioni esplosive) di una Età geologica compresa tra l'Eocene medio (~45 Ma) e il Pleistocene medio (~0,6 Ma).

La collisione tra il margine della placca continentale Nordamericana e il margine della placca oceanica di Farallón (Figura 6a) è la principale responsabile della geologia, del vulcanismo e della sismotettonica dell'area in esame (Aguillón-Robles et al., 2014 e Ferrari et al., 2014).

La Hyalite si rinviene, in forma botroidale² (Figura 7), generalmente su riolite ignimbritica (la ignimbrite è costituita dall'aggregazione di frammenti sottili di cenere vulcanica e di pomice).

Qui, durante l'Oligocene inferiore (~32-28 Ma) e in seguito durante il Miocene inferiore (~23-20 Ma), avvennero imponenti eruzioni piroclastiche esplosive ("ignimbrite flare-up"). Si trattava di eruzioni attorno alla circonferenza della camera magmatica che generarono, per il susseguente crollo della stessa causato dal suo parziale svuotamento, quella che alcuni autori definiscono: la "graben³ caldera" della Provincia vulcanica della Sierra Madre Occidentale (Tristán-González et al., 2009 e Aguirre Díaz et al., 2008).

Il contesto geodinamico parrebbe essere stato: rallentamento e susseguente aumento dell'angolo d'inclinazione (Figura 6b) della subduzione della placca oceanica (costituita perlopiù da basalti, quindi più densa della placca continentale) di Farallón (slab) sotto la placca



Fig. 7 Campione di Hyalite fluorescente in forma botroidale di San Luis Potosí su matrice di riolite ignimbritica (50 g; 7 × 4 × 2 cm). La foto è stata scattata alla luce del giorno. (Proprietà e foto: G.L. Cattaneo)

² Botroidale: dal greco antico βότρυς (bòtrys), grappolo d'uva.

³ Graben: una fossa tettonica, ovvero una porzione di crosta terrestre sprofondata a causa di un sistema di faglie dirette in un regime tettonico distensivo.



Fig. 8 Domo vulcanico in prossimità del deposito.
(Foto: G.L. Cattaneo)



Fig. 9 Uno degli autori (G.L. Cattaneo) durante la campagna di rilevamento.
(Foto: A. Pérez)



Nordamericana, e la successiva rottura definitiva (Figura 6c) dello slab della Farallón stessa (*slab break-off*) con la formazione di una finestra astenosferica (*slab window*) durante il Miocene inferiore.

Potrebbe essere questa la risposta all'enigma della massiccia *ignimbrite flare-up* di magmi silicei: fusione parziale della crosta per cristallizzazione frazionata/assimilazione di magma femico (costituito da minerali ferromagnesiaci) proveniente dal mantello superiore a cominciare dalla fase iniziale della rottura dello slab della Farallón.

Geologia dell'area di studio

L'area in esame (Figura 8 e Figura 9) è costituita da una serie di domi vulcanici⁴ allineati prevalentemente lungo un sistema di faglie dirette con orientamento principale NW-SE (Rodríguez-Ríos, 2013). Qui, durante l'Oligocene inferiore (~31-28 Ma) si innesca una significativa fase tettonica distensiva, concausa della formazione del diffuso "tappeto" di domi vulcanici presenti nel Campo Vulcanico di San Luis Potosí.

La concomitanza dell'allineamento dei domi con il sistema di faglie, porterebbe a supporre che la lava e il materiale piroclastico di cui sono costituite queste strutture cupoliformi, sarebbero fuoriuscite oltre che dal condotto di un vulcano preesistente, anche da alcune di queste faglie dirette.

È la zona con un maggior assottigliamento crostale dove si innesca questo sistema di faglie allineate che, a sua volta, genera la fase idrotermale (Nieto-Samiego et al., 2005).

Nel lavoro di Alva Valdivia et al., 2012 gli autori stimano la temperatura di messa in posto dell'ignimbrite di San Luis Potosí tra i 280°C e i 360°C e individuano una fase idrotermale tra i 100°C e 250°C.

L'idrotermalismo, grazie alla circolazione di fluidi caldi già presenti all'interno delle fratture e all'azione delle acque meteoriche, altera il vetro vulcanico dell'ignimbrite



Fig. 10 Campione di Hyalite fluorescente in forma botroidale di San Luis Potosí su matrice di riolite ignimbritica a luce bianca (a sinistra) e a luce ultravioletta onde lunghe (365 nm) (a destra). Peso 64 g; dimensioni 8 x 4 x 2 cm. (Proprietà e foto: G.L. Cattaneo)

⁴ Domo vulcanico: un edificio a forma di cupola generato da una effusione lenta di magma estremamente viscoso e acido (ricco in Silice).

Tabella 1

Campione	Peso (ct)	Taglio	Densità	Indice di Rifrazione
ZAC1	1,45	Triangolare composito	2,16	1,460
ZAC2	2,31	Ovale composito	2,16	1,460
ZAC3	1,08	Carré a gradini	2,16	1,460
ZAC4	1,06	Triangolare composito	2,15	1,460
ZAC5	0,53	Ottagonale a gradini	2,15	1,460
ZAC6	0,29	Trapezoidale a gradini	2,15	1,460
ZAC7	0,28	Triangolare a gradini	2,16	1,460
ZAC8	0,22	Ottagonale a gradini	2,16	1,460
ZAC9	0,15	Triangolare a gradini	2,16	1,460
ZAC10	1,14	Cuscino composito	2,14	1,460
ZAC11	0,98	Ovale composito	2,18	1,460

Tab. 1 Elenco dei campioni provenienti da Zacatecas. I campioni da ZAC1 a ZAC9 sono di proprietà di G.L. Cattaneo. I campioni ZAC10 e ZAC11 sono di proprietà di F. Butini.

(devettrificazione) liberando SiO_2 e producendo minerali delle argille (Dobson et al., 2008). Si ritiene che gli Opali derivino proprio dall'alterazione di rocce silicee (come ad esempio l'ignimbrite) seguita dalla precipitazione dell'Opale stesso in cavità e fessure, da fluidi arricchiti in SiO_2 ; durante la precipitazione alcune impurità ed elementi in tracce possono entrare nella struttura dell'Opale determinandone colore ed eventuale luminescenza (Gaillou et al. 2008). La luminescenza verde di molti Opali da varie località è nota da tempo e viene generalmente attribuita alla presenza del gruppo Uranile (Othmane et al., 2016). In accordo con Massey et al., 2014, l'Uranio, si lega come catione Uranile (UO_2^{2+}) alla struttura reticolare SiO_2 della Hyalite generando la marcata fluorescenza (Figura 10). Secondo uno studio di Banning et al., 2012, l'Uranio, presente nell'area come elemento in traccia nelle acque sotterranee profonde, è stato rilasciato in conseguenza dell'alterazione idrotermale

della riolite ignimbritica durante la fase di devettrificazione e di argillificazione.

Descrizione del deposito del Campo Vulcanico di San Luis Potosí

Si tratta di un deposito costituito da breccie ignimbritiche riolitiche con dimensioni che vanno dai 20-50 mm dei frammenti piroclastici minuti angolari e subarrotondati cementati da una matrice di cenere vulcanica, ai 4-5 m dei megablocchi riolitici. In sequenza stratigrafica, alla serie ignimbritica riolitica in megablocchi, blocchi e clasti cementati, si alternano sottili livelli di cenere e pomice piroclastica. La Hyalite fluorescente si rinviene generalmente tra 50 cm e 1 m di profondità, all'interno dei blocchi e megablocchi di

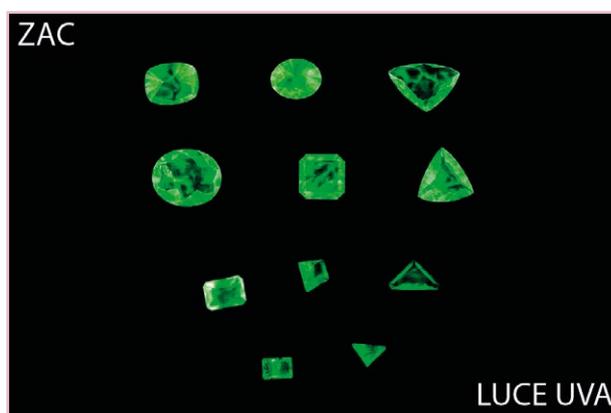


Fig. 11 Campioni sfaccettati di Hyalite fluorescente di Zacatecas: a luce bianca (a sinistra) e a luce UVA (a destra). (Foto: F. Butini)

Tabella 2

Campione	Peso (ct)	Taglio	Densità	Indice di Rifrazione
SLP1	1,35	Ottagonale composito	2,17	1,460
SLP2	1,99	Ottagonale composito	2,17	1,460
SLP3	1,02	Triangolare composito	2,17	1,460
SLP4	1,02	Trapezoidale a gradini	2,16	1,460
SLP5	0,97	Ottagonale a gradini	2,15	1,460
SLP6	1,07	Trapezoidale a gradini	2,17	1,460
SLP7	1,86	Goccia composito	2,16	1,460
SLP8	1,46	Navette composito	2,16	1,460
SLP9	7,00	Ottagonale composito	2,17	1,460
SLP10	4,21	Trapezoidale composito	2,17	1,458
SLP11	3,53	Ovale composito	2,17	1,460

Tab. 2 Elenco dei campioni provenienti da San Luis Potosí. I campioni sono di proprietà di G.L. Cattaneo.

riolite ignimbratica compatta ed è più frequente in piccole sacche e cavità, che in estese e profonde fratture che possono interessare la roccia stessa. Da sottolineare che la "Hyalite verde" (ovvero estremamente fluorescente alla luce del giorno) rappresenta non più del 3% di tutta la Hyalite fluorescente raccolta finora nel Campo Vulcanico di San Luis Potosí.

Analisi gemmologica standard

Le Analisi sono state condotte su n° 11 campioni di Hyalite provenienti dall'area di Zacatecas, Messico (Tabella 1, Figura

11) e n° 11 campioni di Hyalite provenienti dall'area di San Luis Potosí, Messico (Tabella 2, Figura 12), presso il Laboratorio dell'Istituto Gemmologico Nazionale di Roma.

Nella prima fase di lavoro sono state svolte Analisi gemmologiche standard tra cui la misurazione della Densità (compresa tra 2,14 e 2,18) e la rilevazione dell'Indice di Rifrazione (1,460). I risultati corrispondono a quelli dell'Opale e sono descritti nelle Tabelle 1 e 2 (Anderson, 1971).

Esposti alla luce ultravioletta tutti i campioni mostravano una forte fluorescenza verde.



Fig. 12 Campioni sfaccettati di Hyalite fluorescente di San Luis Potosí: a luce bianca (a sinistra) e a luce UVA (a destra). (Foto: F. Butini)

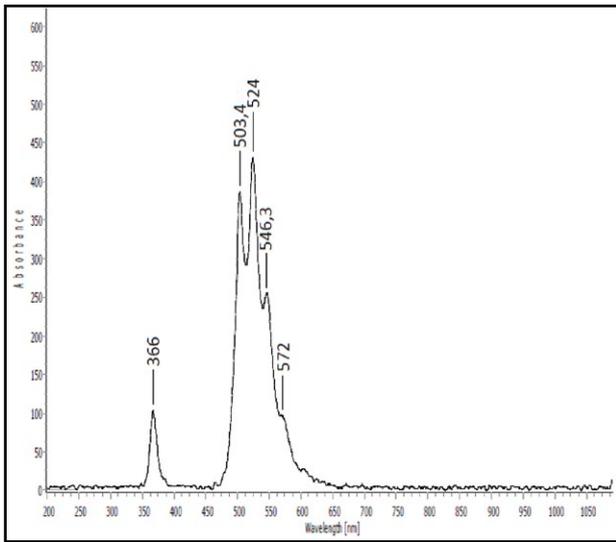


Fig. 13 Spettro PL di un campione sfaccettato di Hyalite fluorescente proveniente da San Luis Potosí. Sono indicati i picchi a 503, 524, 546 e 572 del catione Uranile (UO_2)²⁺.

Spettroscopia PL

Sottoposti ad Analisi della fluorescenza, tutti i ventidue campioni sopradescritti, hanno evidenziato la tipica emissione del **catione Uranile (UO_2)²⁺ responsabile della colorazione verde delle gemme** (Figura 13), caratterizzata da picchi a 503, 524, 546 e 572 nm (il picco a 366 nm è dovuto alla pompa).

Le Analisi sono state effettuate presso il Laboratorio dell'Istituto Gemmologico Nazionale di Roma, utilizzando uno spettrometro in fibra SPM-002 Photon Control con risoluzione spettrale di 1 nm, sorgente a led D1B della Thorlabs a 365 nm.

Spettrofotometria UV-Visibile

Tutti i campioni analizzati con questa tecnica mostrano un'ampia trasmissione in tutta la porzione visibile (tra 400 e 700 nm) e ampie bande di assorbimento che vanno dal violetto all'ultravioletto con picchi a 432 (spalla), 420, 410, 370 e 360 nm (Figura 14). Tale andamento rivela, in modo palese, che non c'è alcun contributo nel visibile alla colorazione verde. È dunque l'intensa fluorescenza l'unica causa del colore di queste gemme, così marcata da essere evidente in alcuni campioni anche alla luce solare (comportamento fotocromatico).

Le Analisi sono state effettuate presso il Laboratorio dell'Istituto Gemmologico Nazionale di Roma, utilizzando uno spettrofotometro UV-Vis Jasco V-630, in assorbanza con velocità di scansione di 200 nm/min, con un intervallo dati di 0,5 nm e un'ampiezza di banda di 1,5 nm.

Diffrazione a raggi X (XRD)

Poiché le differenti specie di Opali differiscono tra loro per grado di cristallinità si è provveduto ad effettuare una Analisi diffrattometrica a raggi X (XRD). Le Analisi sono state condotte presso l'Università degli Studi di Ferrara con un diffrattometro Bruker D8 Advance (equipaggiato con tubo a raggi-X con anodo in rame e rivelatore a stato solido Si(Li) "Sol-X") e presso l'Università di Padova con un diffrattometro Panalytical X'Pert Pro (equipaggiato con tubo a raggi X con anodo in cobalto e rivelatore allo stato solido X'Celerator). Il grado di cristallinità permette di suddividere gli Opali in tre "tipologie": Opale-C, il più

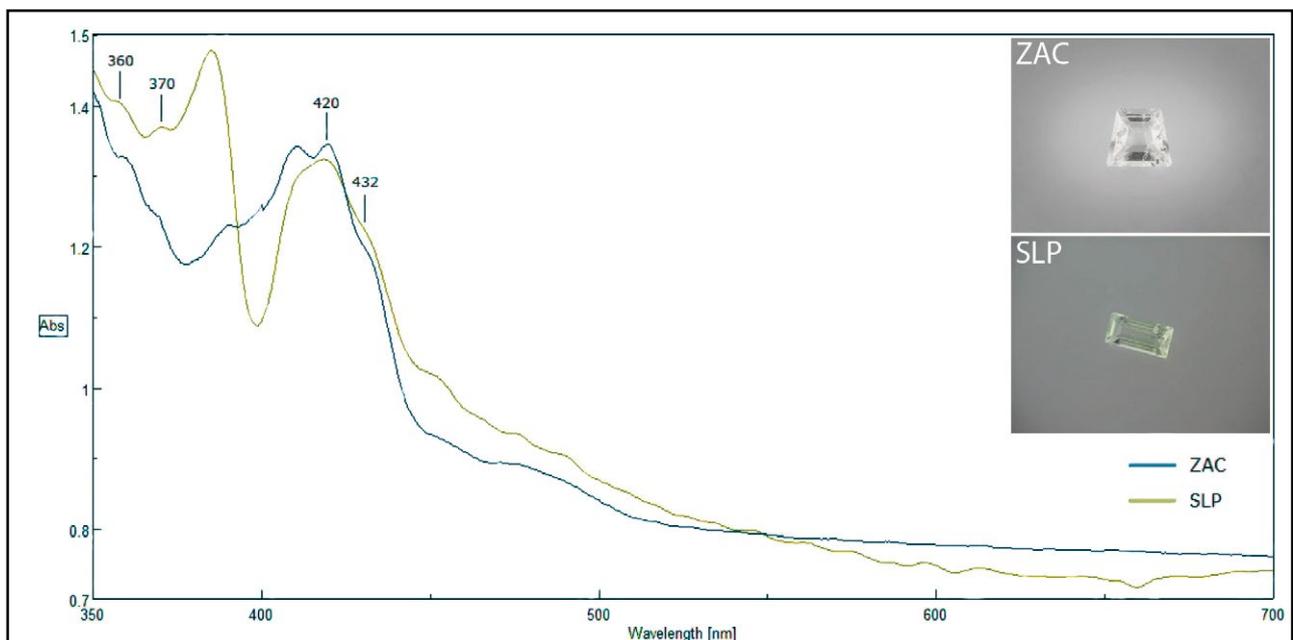


Fig. 14 Confronto tra lo spettro UV-Vis di un campione sfaccettato di Hyalite fluorescente proveniente da Zacatecas (blu) e di un campione sfaccettato proveniente da San Luis Potosí (verde).

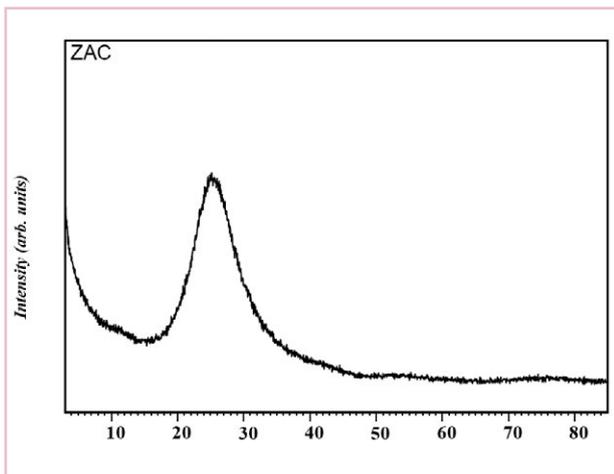


Fig. 15a Diffattogramma dell'Opale di Zacatecas. Analisi eseguita con radiazione X del cobalto.

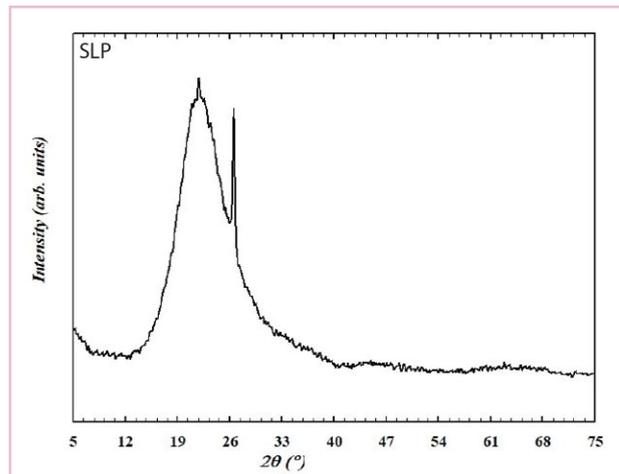


Fig. 15b Diffattogramma dell'Opale di San Luis Potosí. Analisi eseguita con radiazione X del rame.

ordinato, costituito per lo più di α -Cristobalite; Opale-CT, mediamente ordinato, costituito di α -Cristobalite e α -Tridimite; Opale-A, completamente amorfo (Elzea et al., 1994). I tracciati XRD degli Opali dell'area di Zacatecas e di San Luis Potosí presentano un unico picco largo a 4,08 Å di d-spacing, corrispondente a 25,33° di 2 θ per la radiazione X del cobalto (Figura 15a) e a 21,75° di 2 θ per la radiazione X del rame (Figura 15b) che ci permettono di identificarlo come un Opale di tipo A (Ghisoli et al., 2010 e Sodo et al., 2016). Nel diffattogramma in Figura 15b compare anche il picco del quarzo (26,6° di 2 θ) come componente accessorio. Anche i diffattogrammi della matrice ignimbritica delle due località (Figure 16a e 16b) presentano una composizione mineralogica simile, caratterizzata prevalentemente dalla presenza di quarzo, sanidino, plagioclasio e montmorillonite. L'argilla montmorillonitica è segno inequivocabile del fenomeno idrotermale di alterazione, presente sia nella ignimbrite di Zacatecas che in quella di San Luis Potosí (come risulta dalle Analisi XRD).

Spettroscopia Raman

Le misure Raman sui campioni di Zacatecas sono state effettuate presso il Laboratorio di spettroscopia Raman del Dipartimento di Scienze dell'Università Roma Tre tramite un microspettrometro LabRAM della Horiba Jobin-Yvon equipaggiato con un microscopio Olympus. Le misure sono state effettuate utilizzando una sorgente laser He-Ne a 633 nm con una potenza di uscita nominale di 18 mW. Non sono stati utilizzati filtri neutri per abbassare la potenza sul campione in quanto non sono stati osservati danni dovuti all'irraggiamento laser. La radiazione laser incidente è stata focalizzata mediante un obiettivo da microscopio 20X a lunga distanza di lavoro. La radiazione diffusa è stata raccolta in backscattering e filtrata da un filtro notch prima di essere

dispersa da un reticolo a 1800 righe/mm e analizzata da un rivelatore CCD da 1024×256 pixel. La risoluzione spettrale nominale è di 1 cm⁻¹. Per ciascun campione sono stati investigati tre diversi punti – per testarne l'omogeneità – e gli spettri sono stati acquisiti per 3 secondi, 5 accumulazioni ciascuno.

Tutti i campioni di Zacatecas hanno mostrato lo stesso identico spettro Raman, caratterizzato da una larga e intensa banda centrata a 430 cm⁻¹ (in Figura 17 ne viene riportato uno a titolo di esempio). Questo è lo spettro tipico dell'Opale-A, la tipologia corrispondente alla struttura più disordinata, prevalentemente amorfa (Sodo et al., 2016).

Le misure Raman sui campioni di San Luis Potosí sono state invece effettuate utilizzando un spettrometro Raman GemmoRaman 532. Per le rilevazioni è stata usata una sorgente laser Nd:YAG a 532 nm con una potenza di uscita nominale di 150 mW. La risoluzione spettrale nominale è di 11 cm⁻¹. Gli spettri sono stati acquisiti per 3 secondi, 10 accumulazioni ciascuno.

Tutti i campioni hanno mostrato lo stesso spettro Raman, caratterizzato da una larga e intensa banda centrata a ~430 cm⁻¹ (in Figura 18 ne viene riportato uno a titolo di esempio). Si possono osservare bande anche a ~790, ~970 e 1075 cm⁻¹. Tutte queste bande corrispondono alle vibrazioni Si-O o Si-OH (Rondeau et al., 2004).

Le Analisi sono state effettuate presso il Laboratorio dell'Istituto Gemmologico Nazionale di Roma.

Note

Tutti i campioni sono stati esaminati con una camera a ionizzazione, con sensibilità di 100 μ Sv: **non è stata rilevata presenza di attività radioattiva.**

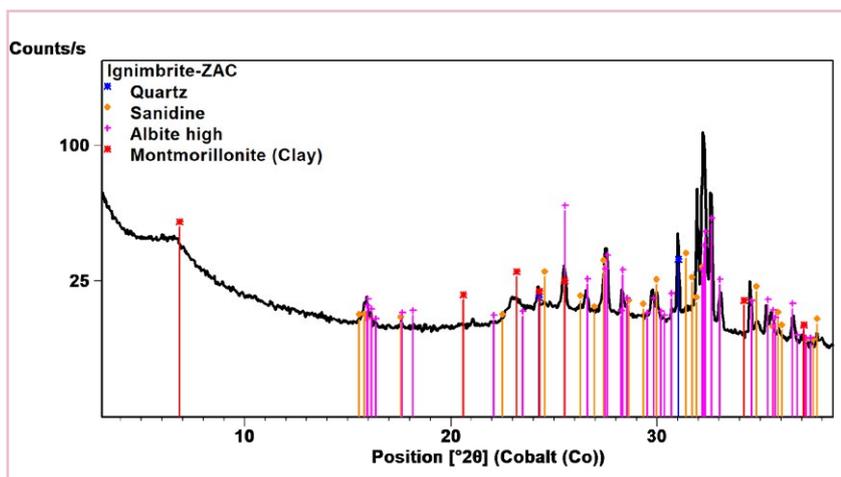


Fig. 16a Diffattogramma della ignimbrite di Zacatecas.

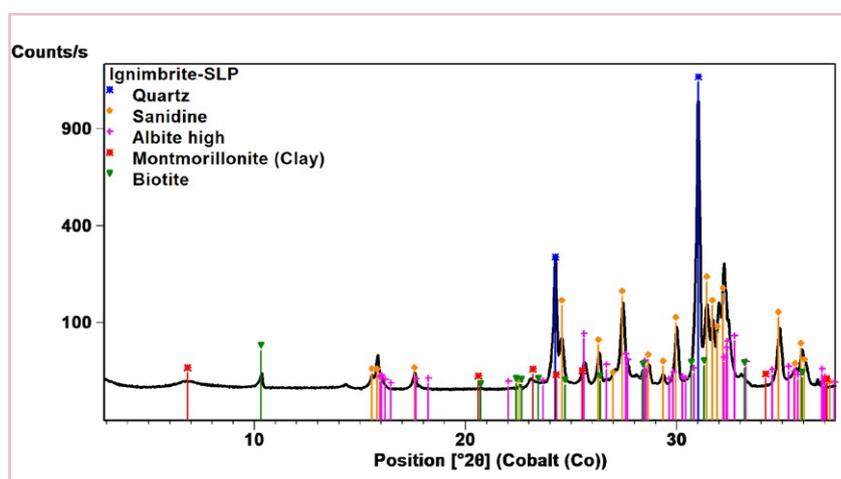


Fig. 16b Diffattogramma della ignimbrite di San Luis Potosí.

Conclusioni

Dal punto di vista gemmologico, per quanto concerne l'Analisi standard è evidente come i dati (Indice di rifrazione e Densità) siano costanti, tanto per il materiale di Zacatecas quanto per quello di San Luis Potosí, e permettano chiaramente di identificare tutti i campioni come Opale.

Le Analisi di laboratorio hanno posto in evidenza un elevato grado di omogeneità tra i campioni delle due regioni messicane, in particolar modo si dimostra come entrambe debbano la loro colorazione verde alla fluorescenza causata dal catione Uranile (UO_2^{2+}) e non a quote di assorbimento nel range del visibile.

Gli spettri Raman e i tracciati XRD confermano entrambi la medesima natura di Opale amorfo (Opale-A). Inoltre, il loro caratteristico aspetto vetroso ci consente di classificare tutti i campioni messicani analizzati: Opale varietà Hyalite (Opale-AN).

L'ignimbrite di San Luis Potosí, alterandosi durante la fase idrotermale, ha liberato Silice e altri elementi tra cui l'Uranio. La Silice, precipitando sotto forma di Hyalite all'interno di cavità e fessure, ha agito da "spugna" incorporando l'Uranio disperso nel fluido idrotermale, sotto la forma di catione Uranile (UO_2^{2+}); da cui, la marcata fluorescenza.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento al Dottor Guido Roghi (CNR Padova) per alcuni suoi preziosi consigli in corso d'opera durante la lunga campagna di rilevamento, alla Dottorssa Francesca Gaeta (IGN Roma) per il suo importante supporto tecnico in alcune Analisi e al Grafico Federico Cisana (MBE Albino) per le sue attente elaborazioni grafiche.

E per finire, un ringraziamento e un affettuoso abbraccio ai compagni di rilevamento di questa lunga ricerca: Alfredo Pérez Navarro, Luis Ricardo Taylor e Carlos Antonio Rodríguez.

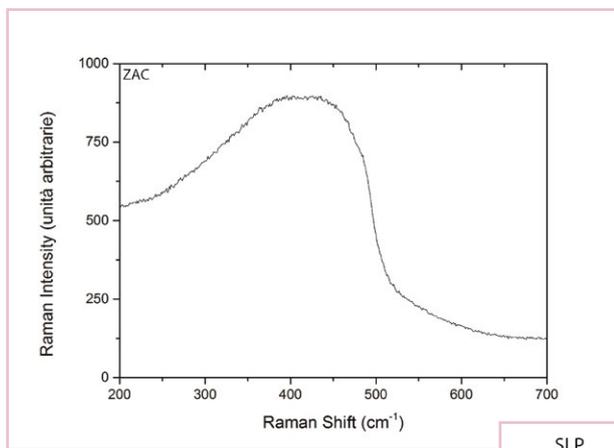
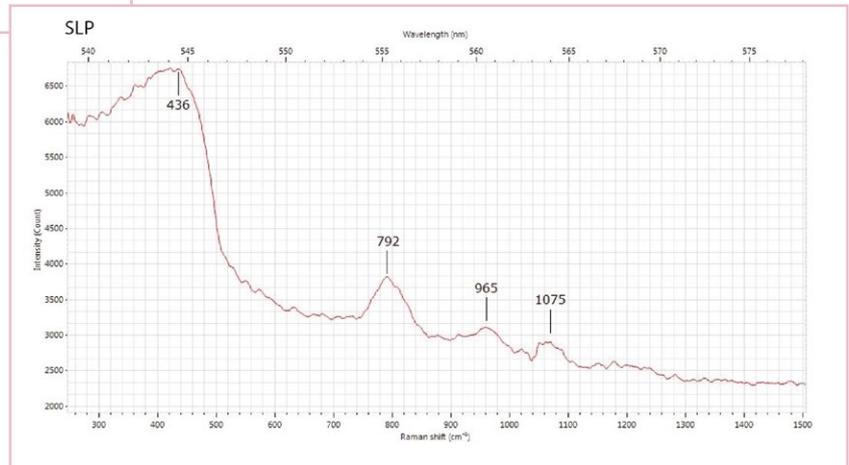


Fig. 17 Spettro Raman di un campione di Hyalite fluorescente proveniente da Zacatecas.

Fig. 18 Spettro Raman di un campione di Hyalite fluorescente proveniente da San Luis Potosí.



Bibliografia:

- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G. de J., López-Doncel, R., Bellon, H., Martínez-Esparza, G., 2014, "Eocene to Quaternary mafic-intermediate volcanism in San Luis Potosí, central Mexico: The transition from Farallon plate subduction to intra-plate continental magmatism": *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 276, 152-172.
- Aguirre-Díaz, G. J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., Gutiérrez-Palomares, I., 2008, The ignimbrite flare-up and graben calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico: *Developments in Volcanology*, v. 10, cap. 4, 143-180.
- Alva Valdivia, L.M., Torres-Hernández, J. R., González Rangel, J. A., Caballero Miranda, C. I., Rosas Elguera, J. G., Romero Villalobos, N., 2012, Paleomagnetismo en la determinación de la temperatura de emplazamiento de la Ignimbrita Panalillo, San Luis Potosí, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, n. 3, 619-638.
- Anderson, B.W., 1971, *Gem Testing*: Newnes-Butterworth, 8° ed., 416 p.
- Banning A., Cardona, A., 2012, Uranium and arsenic dynamics in volcano-sedimentary basins – An exemplary study in North-Central Mexico: *Applied Geochemistry*, v. 27 (11), 2160-2172.
- Dobson, P. F., Fayek, M., Goodell P., Ghezzehei, T. A., Melchor, F., Murrell, M. T., Simmons, A., 2008, Stratigraphy of the PB-1 Well, Nopal I Uranium Deposit, Sierra Peña Blanca, Chihuahua, Mexico: *International Geology Review*, v. 50, n. 11, 959-974.
- Elzea, J. M., Odom, I. E., Miles, W. J., 1994, Distinguishing well ordered opal-CT and opal-C from high temperature cristobalite by X-ray diffraction: *Analytica Chimica Acta*, v. 286 (1), 107-116.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margenoccidental de Norteamérica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana - Volumen Conmemorativo del Centenario - Temas Selectos de la Geología Mexicana*, Tomo LVII, n. 3, 343-378.
- Flörke, O.W., Graetsch, H., Martin, B., Röller, K., Wirth, R., 1991, Nomenclature of micro-and non-crystalline silica minerals, based on structure and microstructure, *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, v. 163, 19-42.
- Fritsch, E., Megaw, P. K. M., Spano, T. L., Chauviré, B., Rondeau, B., Gray, M., Hainschwang, T., Renfro, N., 2015, Green-Luminescing Hyalite Opal from Zacatecas, Mexico: *The Journal of Gemmology*, v. 34, n. 6, 490-508.
- Gaillou, E., Delaunay, A., Rondeau, B., Bouhnik-Le Coz, M., Fritsch, E., Cornen, G., Monnier, C., 2008b, The geochemistry of opals as evidence of their origin: *Ore Geology Reviews*, v. 34, 113-126.
- Ghisoli, C., Caucia, F., Marinoni, L., 2010, "XRPD patterns of opals: A brief review and new results from recent studies": *Powder Diffraction*, v. 25 (3), 274-282.
- Massey, M. S., Lezama-Pacheco, J. S., Nelson, J. M., Fendorf, S., Maher, K., 2014, Uranium Incorporation into Amorphous Silica: *Environmental Science and Technology*, v. 48 (15), 8636-8644.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Camprubí, A., 2005, "La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica": *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana - Volumen Conmemorativo del Centenario - Temas Selectos de la Geología Mexicana*, Tomo LVII, n. 3, 285-318.
- Othmane, G., Allard, T., Vercoeur, T., Morin, G., Fayek, M., Calas, G., 2016, "Luminescence of uranium-bearing opals: Origin and use as a pH record": *Chem. Geol.*, v. 423, 1-6.
- Rodríguez-Ríos, R., Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., 2013, Estructura y geoquímica de un grupo de domos dacíticos del componente del Campo Volcánico de San Luis Potosí, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 65, n. 1, 1-14.
- Rondeau, B., Fritsch, E., Guiraud, M., Renac, C., 2004, "Opals from Slovakia («Hungarian» opals): a re-assessment of the conditions of formation": *European Journal of Mineralogy*, v. 16 (5), 789-799.
- Sodo, A., Casanova Municchia, A., Barucca, S., Bellatreccia, F., Della Ventura, G., Butini, F., Ricci, M. A., 2016, Raman, FT-IR and XRD investigation of natural opals: *Journal of Raman Spectroscopy*, 47 (12), 1444-1451.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., Labarthe-Hernández, G., 2009, Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, n. 3, 287-303.