

Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”	Vol. 54 (2025)	pp. 81-88	Trieste 2025
--	----------------	-----------	--------------

JOSEF VUCH¹, BENEDETTA RIGO², ALBERTO RIVA^{3,4,5}

CENSIMENTO DEI “BATTERI ORO E ARGENTO” NELLE GROTTI DEL FRIULI-VENEZIA GIULIA: NASCITA DEL PROGETTO, FLUORESCENZA BATTERICA E SPETTROMETRIA APPLICATA

ABSTRACT

The microbial community known as “golden and silver bacteria” typically forms biofilm-like layers coating cave walls, often associated with the presence of water droplets. These biofilms become visible only when illuminated with light sources characterized by specific wavelengths capable of exciting the pigments responsible for their fluorescence.

As part of this study, in addition to defining the objectives of a research project dedicated to the identification and mapping of golden and silver bacteria in the caves of Friuli-Venezia Giulia, spectrometric tests were conducted on several lamps commonly used in speleological progression.

Various commercial UV torches were also analyzed, leading to the identification of a model that enables a more selective and clearer visualization of the phenomenon.

RIASSUNTO

La comunità microbica nota come “batteri oro e argento” forma tipicamente strati simili a biofilm che ricoprono le pareti delle grotte, spesso associati alla presenza di goccioline d’acqua. Questi biofilm diventano visibili solo quando illuminati con sorgenti luminose caratterizzate da specifiche lunghezze d’onda in grado di eccitare i pigmenti responsabili della loro fluorescenza.

Nell’ambito di questo studio, oltre a definire gli obiettivi di un progetto di ricerca dedicato all’identificazione e alla mappatura dei batteri oro e argento nelle grotte del Friuli-Venezia Giulia, sono stati condotti test spettrometrici su diverse lampade comunemente utilizzate nella progressione speleologica.

Sono state analizzate anche varie torce UV commerciali, che hanno portato all’identificazione di un modello che consente una visualizzazione più selettiva e chiara del fenomeno.

¹ Club Alpinistico Triestino.

² Unione Speleologica Pordenonese.

³ Gruppo Grotte Solve CAI Belluno.

⁴ Gruppo Grotte Treviso.

⁵ Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra.

INTRODUZIONE

L'osservazione di colonie batteriche note come “batteri oro e argento” ha suscitato crescente interesse tra speleologi e biologi, poiché questi biofilm fluorescenti potrebbero giocare un ruolo importante negli ecosistemi ipogei, caratterizzati da scarsità di nutrienti e assenza di luce solare. In tali ambienti, l'attività microbica rappresenta la base delle reti trofiche e costituisce una risorsa primaria per molti organismi cavernicoli.

Nel 2024, gli autori di questo articolo hanno deciso di avviare un censimento sistematico di questi biofilm nelle grotte del Friuli-Venezia Giulia. La decisione è nata dall'assenza di dati strutturati sulla distribuzione dei “batteri oro e argento” nella regione e dall'interesse ecologico legato al possibile ruolo di questi biofilm nell'equilibrio delle comunità ipogee. In aggiunta, l'avvento delle lampade LED ha reso possibile l'osservazione di questi fenomeni fluorescenti, fino ad allora completamente nascosti.

La possibilità che esistano altri batteri con pigmenti fluorescenti sensibili a lunghezze d'onda diverse da quelle attualmente utilizzate apre scenari affascinanti. Se la tecnologia delle lampade non si fosse evoluta verso il blu-viola, questi biofilm potrebbero non essere mai stati scoperti. È plausibile che ulteriori pigmenti, attivabili da altre lunghezze d'onda, attendano solo la “luce giusta” per essere rivelati.

È importante sottolineare che la fluorescenza osservata non implica la presenza di metalli preziosi. Sebbene alcune specie batteriche come *Cupriavidus metallidurans* siano in grado di precipitare oro metallico in condizioni specifiche, le colonie osservate nelle grotte devono il loro aspetto alla fluorescenza dei pigmenti piuttosto che alla presenza di metalli. Questo sfata l'idea di depositi d'oro o argento e riconduce il fenomeno a un processo biochimico legato ai pigmenti microbici.

Analisi condotte in Slovenia⁽¹⁾ e Nuova Guinea⁽²⁾ hanno dimostrato che molte colonie fluorescenti sono costituite da batteri del genere *Pseudomonas*, noti per la produzione di pigmenti come le pioverdine, che funzionano sia come siderofori per il trasporto del ferro sia come molecole fluorescenti. Tuttavia, la comunità batterica è spesso complessa e include diversi generi minori, suggerendo che la fluorescenza sia un fenomeno diffuso e non limitato a un'unica specie.

Storicamente, la fluorescenza nelle grotte non era osservabile perché le fonti luminose utilizzate dagli speleologi, candele, lampade a carburo o alogene, emettevano principalmente nello spettro rosso e infrarosso, oltre 700 nm, lontano dalle lunghezze d'onda necessarie per eccitare i pigmenti batterici. Solo con l'avvento delle lampade LED, in grado di emettere luce nel blu-viola, è stato possibile osservare i riflessi caratteristici dei biofilm. Questa innovazione tecnologica ha trasformato la percezione degli ambienti ipogei, rivelando un vero e proprio arcobaleno nel buio, prima invisibile.

La fluorescenza è un fenomeno fisico in cui alcune molecole, dette fluorofori, assorbono fotoni a una certa lunghezza d'onda e riemettono luce a lunghezze d'onda maggiori. Nei biofilm batterici osservati nelle grotte, questa proprietà è legata a pigmenti specifici prodotti dai microrganismi. Quando illuminati con radiazioni tra 393 e 419 nm, i pigmenti assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile, tipicamente a 460 nm (blu) e 600 nm (arancione)⁽³⁾ (Figura 1).

REALIZZAZIONE DELLO SPETTROMETRO AUTOCOSTRUITO

Per valutare quali sorgenti luminose fossero realmente efficaci nell'evidenziare la fluorescenza batterica, è stato realizzato uno spettrometro autocostruito (Figura 2) ispirato al progetto open-hardware di GaudiLabs (GaudiLabs LLC, Lucerna, Svizzera).

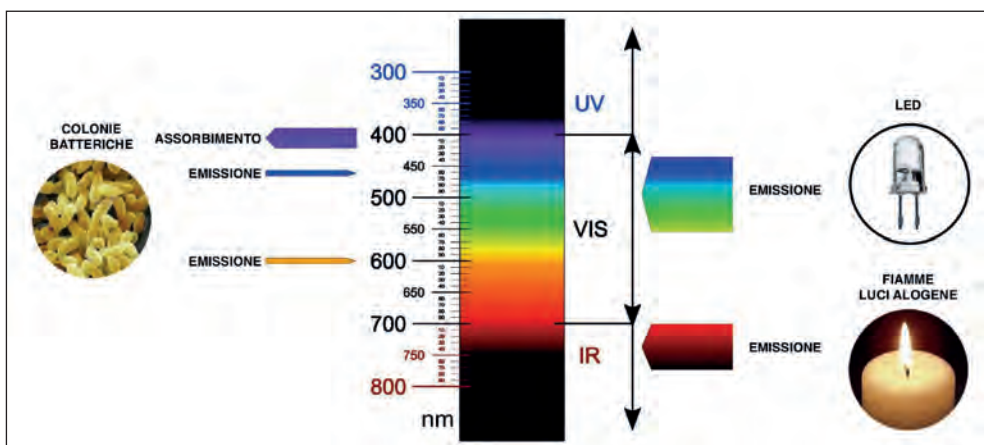


Fig. 1 - I pigmenti dei biofilm batterici assorbono luce tra 393-419 nm (viola) ed emettono fluorescenza a 460 nm (blu) e 600 nm (arancione). Le luci tradizionali emettono nell'intervallo rosso-infrarosso (>700 nm), mentre i LED, utilizzati in speleologia, emettono luce tra 446 e 556 nm, vicino al massimo assorbimento del biofilm. Questo ha permesso l'osservazione delle colonie batteriche solo con l'illuminazione LED, rispetto a quella tradizionale⁽³⁾.

Componenti principali:

- Modulo telecamera USB HBV-1313, 1600×1200 px, 2 MP, con obiettivo grandangolare (Keenso, store amazon)
- Griglia di diffrazione lineare 1000 linee/mm (fotomir24 store eBay)
- Scatola stampata in 3D in PLA nero.
- Fessura ottenuta incidendo un film di alluminio con una lama sottile.



Fig. 2 - Spettrometro autocostruito usato per misurare lo spettro di emissione delle varie sorgenti luminose studiate durante le fasi preparatorie di questo progetto.

Le immagini spettrali ottenute sono state elaborate tramite il software online messo a disposizione dal progetto GaudiLabs (<https://gaudi.ch/Spectrometer/>). Lo strumento è stato calibrato utilizzando lo spettro di emissione del mercurio e dell'eupio proveniente da una lampada fluorescente, che presenta righe spettrali note e ben definite (Figura 3).

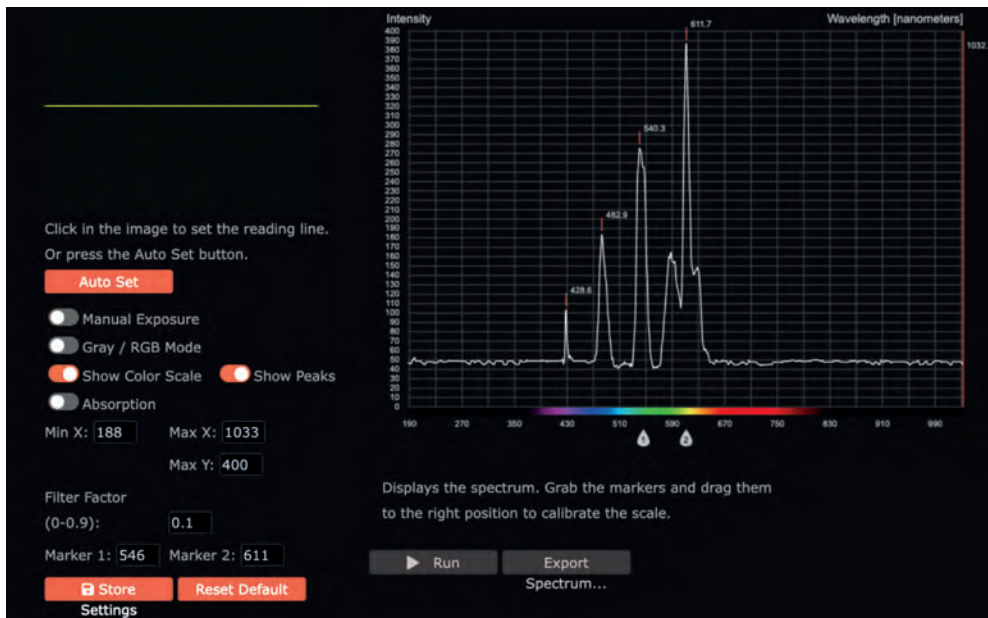


Fig. 3 - Taratura con lampada fluorescente Philips Economy 11 W Energy saver. Poland. Picco del mercurio 546,5 nm, picco del europio 611,6 nm.

RISULTATI SPETTROMETRICI DELLE SORGENTI LUMINOSE TESTATE

Le misurazioni effettuate tramite lo spettrometro autocostruito hanno permesso di analizzare in dettaglio lo spettro di emissione di diverse lampade normalmente utilizzate per la progressione in grotta. I risultati mostrano che tutte le lampade LED analizzate presentano picchi prevalenti nello spettro del blu (437–455 nm), componente compatibile con l'assorbimento dei pigmenti responsabili della fluorescenza dei biofilm. Tuttavia, queste sorgenti emettono anche un'intensa componente visibile nelle lunghezze d'onda maggiori (verde e rosso), che può mascherare la fluorescenza emessa dai biofilm stessi.

Nella Tabella 1, sono riportati i dati spettrometrici ottenuti dai modelli testati.

VALUTAZIONE DELLE LAMPADE UV PER L'ESALTAZIONE DELLA FLUORESCENZA BATTERICA

Sono state inoltre analizzate diverse lampade UV commerciali, tra cui modelli non filtrati (DARKBEAM 365 nm e 395 nm) e un modello filtrato (DARKDAWN 365 nm). I modelli non filtrati presentano emissione residua nel visibile, tale da mascherare la fluorescenza batterica. Al contrario, la lampada UV filtrata ha mostrato un picco a 371,2 nm con una banda ristretta (360,0–394,0 nm), permettendo una visualizzazione chiara e nitida della fluorescenza, grazie all'assenza quasi totale di emissione nel visibile (Tabella 2).

Modello lampada a LED	Picchi principali dello spettro misurato (nm)	Intervallo dello spettro di emissione (nm)
Rude Nora 2	437,1	403,0 - 652,6
	531,8	
	591,5	
Zebralight, H604d	454,3	435,8 - 686,0
	519,8	
	601,1	
Tikka 350 lumens, PETZL	450,6	426,6 - 679,5
	520,8	
	600,2	
LEDHEADLIGHT,2000lumen	453,4	422,9 - 658,3
	525,4	
	596,5	
KIKKO, fredda	446,9	420,2 - 689,7
	527,2	
	592,8	
Wurkkos, HD20 profondità	450,6	415,5 - 656,5
	527,2	
	596,5	
ACEBEAM profondità	454,3	423,8 - 706,3
	548,5	
	592,8	
Scurion 700, fredda	455,2	426,6 - 654,6
	534,6	
	590,9	
LED, FORCLAZ	451,5	423,8 - 672,2
	513,4	
	595,5	

Tabella 1 - Lampade speleologiche testate, con indicazione dei principali picchi di emissione spettrale e dell'intervallo complessivo di lunghezze d'onda rilevato per ciascuna sorgente luminosa.

Modello lampada UV	Picco principale dello spettro (nm)	Intervallo dello spettro di emissione (nm)
DARKBEAM Torcia UV 365 nm	381,4	361,1 - 420,2
DARKBEAM Torcia UV 395 nm	407,2	386,9 - 442,3
DARKDAWN Torcia UV 365 nm con filtro	371,2	360,0 - 394,0

Tabella 2 - Lampade UV testate, comprendente due modelli non filtrati (DARKBEAM 365 nm e 395 nm) e un modello filtrato (DARKDAWN 365 nm). Per ogni modello è indicato il picco principale dello spettro di emissione e l'intervallo dello spettro di emissione.

CONCLUSIONE OPERATIVA

Le lampade LED da grotta sono sufficienti per osservare i biofilm fluorescenti durante la progressione e hanno avuto un ruolo chiave nella loro individuazione. Le lampade UV filtrate sono più performanti, offrendo un'evidenziazione più chiara e controllabile del fenomeno, particolarmente utile in un contesto di censimento e analisi (Figura 4).

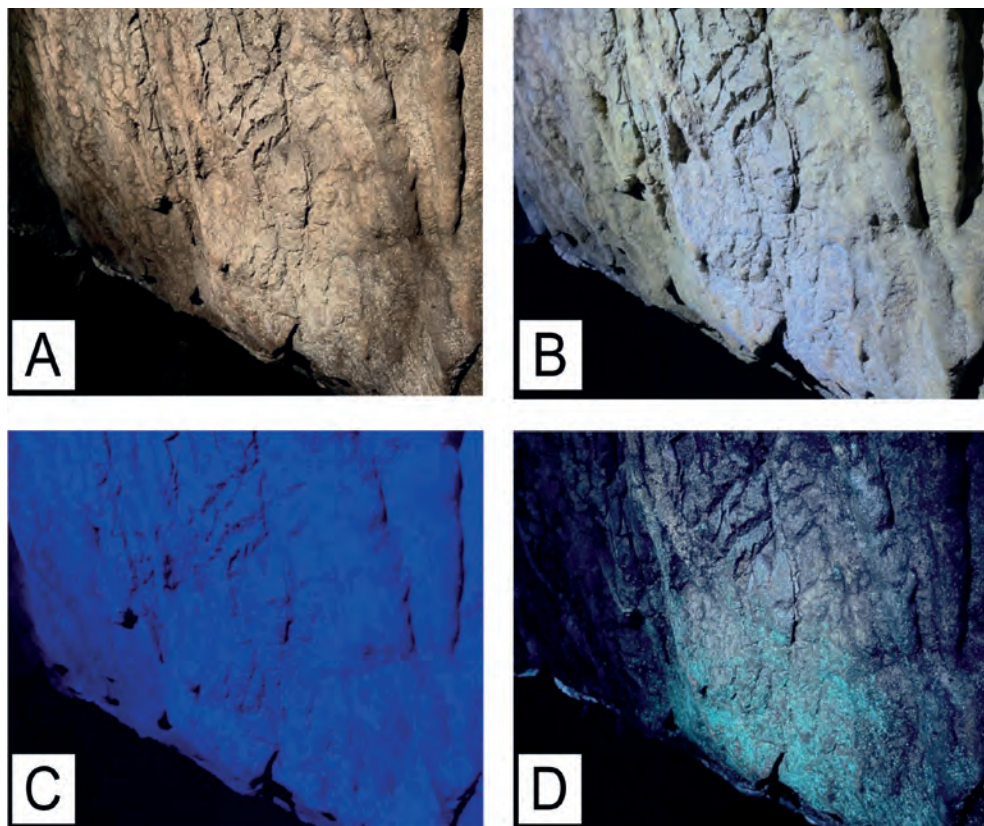


Fig. 4 - Osservazione delle colonie microbiche fluorescenti esposte a diverse fonti luminose.

A: Parete rocciosa della Grotta Azzurra 34 - 257 VG CSR, illuminata con lampada a incandescenza. L'illuminazione diffusa non rivela la presenza di biofilm microbici, che rimangono invisibili sotto questo spettro luminoso.

B: Stessa area fotografata utilizzando lampada speleologica a LED (437 nm). L'emissione nello spettro blu-viola inizia a rivelare riflessi argentati sulla superficie rocciosa, indicatori della presenza di comunità microbiche fluorescenti.

C: Parete illuminata con sorgente LED blu (450 nm). Non è visibile fluorescenza.

D: Medesima sezione sotto illuminazione LED ultravioletta (365 nm). L'eccitazione dei pigmenti batterici produce una fluorescenza intensa, rivelando la complessa distribuzione spaziale delle comunità microbiche e la loro associazione con zone di maggiore umidità superficiale.

La scelta delle sorgenti luminose, validata dalle misurazioni spettrometriche, rappresenta quindi un supporto pratico e concreto per chiunque parteciperà a tale progetto che ha coinvolto l'Unione Speleologica Pordenonese (USP), il Club Alpinistico Triestino (CAT) e il Gruppo

Grotte Solve CAI Belluno e il Gruppo Grotte Treviso per monitorare la presenza di “golden” e “silver bacteria” nelle grotte del Friuli - Venezia Giulia.

È stato realizzato un protocollo per documentare la presenza di batteri nelle cavità censite dal Catasto Speleologico Regionale e creato un sistema di raccolta dati tramite modulo Google, accessibile agli speleologi per registrare informazioni e immagini.

All'interno del modulo Google è possibile trovare il link per visualizzare la comunicazione orale presentata al Convegno Speleo25 “Acque e grotte senza frontiere” e il link per acquistare la lampada LED ultravioletta che meglio rivela la presenza dei “batteri oro e argento”. Infatti la presenza di goccioline di condensa sulle pareti delle grotte può, con la sola luce frontale a LED, dare falsi positivi portando lo speleologo a testimoniare la presenza di batteri argento.

Nel modulo è presente una sezione che si riferisce alla presenza o assenza di tali colonie batteriche e al loro luogo di osservazione (grotta: ingresso, metà, fondo). È inoltre presente una sezione in cui, se presenti, si possono riportare i parametri ambientali; una sezione relativa alla data di osservazione; una sezione in cui ciascuno speleologo può apportare una descrizione dettagliata relativa all'oggetto delle sue osservazioni e una sezione in cui caricare le fotografie delle colonie batteriche di quella specifica grotta.

Si ricorda che osservare la presenza e osservare l'assenza dei batteri oro e argento nelle grotte rappresenta un dato equamente importante ai fini di questo studio, ovvero è necessaria la compilazione del modulo in entrambe le situazioni.

Il modulo Google è visibile scansionando il seguente QR code (Figura 5) con uno smartphone o tablet.



Fig. 5 - QR code con il link al modulo google da compilare per partecipare al censimento.

OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Alla luce dell'importanza ecologica di queste comunità microbiche, e della loro sorprendente visibilità resa possibile dalla tecnologia LED, è stato deciso di avviare un progetto di censimento nelle grotte del Friuli - Venezia Giulia. L'obiettivo è documentare sistematicamente la distribuzione delle colonie di batteri oro e argento, attraverso la collaborazione degli speleologi.

È stato realizzato un modulo online per raccogliere segnalazioni, fotografie e dati catastali delle grotte. Tutte le informazioni saranno integrate in un Geographic Information System (GIS), che consentirà di elaborare mappe di distribuzione e di porre le basi per studi ecologici e microbiologici più approfonditi.

Questo approccio partecipativo mira a coinvolgere la comunità speleologica e a valorizzare il contributo di chi frequenta le cavità del territorio⁽⁴⁾.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MULEC J. et al., 2015 - *Characterization and fluorescence of yellow biofilms in karst caves, southwest Slovenia*. International Journal of Speleology, 44 (2): 107-114.
- (2) TURRINI P. et al., 2020 - *The microbial community of a biofilm lining the wall of a pristine cave in Western New Guinea*, Microbiological research 241: 126584.
- (3) VUCH J., 2023 - *Arcobaleno nel buio*, Cronache ipogee, n. 3.
- (4) RIGO B., VUCH J., 2024 - *Brillanti curiosità nel buio*, Esplorare n. 14 - Appunti di Speleologia Porde-
nonese.