

Research article

Actividad semicuantitativa patogénica de hongos presentes en las cuevas Las Moyas (La Calera) y La Chocoancia (Suesca), Cundinamarca, Colombia

Semiquantitative pathogenic activity of fungi present in the caves Las Moyas (La Calera) and La Chocoancia (Suesca), Cundinamarca, Colombia

Juan López-Caro^{1,2,3} , Felipe Daza-Castañeda^{1,2} , Samuel Alexander Espinosa-Tellez^{1,2} , Ana María Rodríguez-Bustos^{1,3} , Virginia Roa-Angulo⁴ 

¹Universidad El Bosque, Programa de Biología, Laboratorio Esther Lederberg, Bogotá, Colombia.

²Universidad El Bosque, Programa de Biología, Laboratorio de Ictiología y Embriología, Bogotá, Colombia.

³Asociación Espeleológica Colombiana (ESPELEOCOL).

⁴Universidad El Bosque, Programa de Biología, Grupo de Investigación de Biología (GRIB), Bogotá, Colombia.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo determinar la actividad patogénica semicuantitativa de hongos aislados de dos cuevas, una restringida y otra abierta al público, presentes en el departamento de Cundinamarca: las Moyas (La Calera) y la Chocoancia (Suesca). El método empleado se estructuró en 4 fases, en la primera se realizó la recolección de muestras de superficies, suelo y agua al inicio, mitad y final de la cueva con una preservación a 4°C. La segunda fase, consistió en el procesamiento de las muestras, donde se llevó a cabo la siembra utilizando el agar SDA y PDA, se procedió a la inoculación de las muestras, permitiendo su crecimiento a temperatura ambiente durante 7 días. En la tercera fase se realizó la observación e identificación de los hongos. En la última fase se determinó la actividad patogénica evaluando la hemólisis, el crecimiento radial y la actividad fosfolipasa. En la cueva la Chocoancia se encontraron un total de 15 especies, pertenecientes a 11 géneros, en donde se destaca *Histoplasma* sp., *Penicillium* sp., *Penicillium vulpinum* y *Cladosporium* sp.. Por otro lado, en la cueva las Moyas se identificaron un total de 13 especies, pertenecientes a 12 géneros, siendo el más relevante *Penicillium* sp. En ambas cuevas se encontraron a *Cryptococcus* cf. *neoformans*, *Rhodotorula* cf. *mucilaginosa*, *Rhodotorula* cf. *slooffiae* y *Rhizopus* sp. que son las especies con mayor potencial patógeno. Los resultados de la actividad hemolítica, el crecimiento radial y la actividad fosfolipasa plantean la presencia de hongos con posible actividad patogénica en ambas cuevas. Además, de representar un riesgo a la salud pública por su carácter oportunista.

Palabras clave: Fosfolipasa, Hemolítico, Hongo filamentosos, Levadura, Microespeleología, Patógeno.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the semi-quantitative pathogenic activity of fungi isolated from two caves, one restricted and the other open to the public, in the department of Cundinamarca: las Moyas (La Calera) and la Chocoancia (Suesca). The method used was structured in 4 phases. In the first phase, surface, soil, and water samples were collected at the cave's beginning, middle, and end with preservation at 4°C. The second phase consisted of processing the samples, where seeding was carried out using SDA and PDA agar, and the samples were inoculated, allowing them to grow at room temperature for 7 days. In the third phase, the fungi were observed and identified. In the last phase, pathogenic activity was determined by measuring hemolytic activity, radial growth, and phospholipase activity. In the Chocoancia cave, a total of 15 species belonging to 11 genus were found, including *Histoplasma* sp., *Penicillium* sp., *Penicillium vulpinum* y *Cladosporium* sp.. Nevertheless, in the Las Moyas cave, a total of 13 species were identified, belonging to 12 genus, of which the species *Penicillium* sp. stands out. In both caves *Cryptococcus* cf. *neoformans*, *Rhodotorula* cf. *mucilaginosa*, *Rhodotorula* cf. *slooffiae*, and *Rhizopus* sp. were found, which are the species with the greatest pathogenic potential. These results suggest the presence of fungi with possible pathogenic activity in both caves, in addition to representing a risk to public health due to their opportunistic nature.

Keywords: Filamentous fungus, Hemolytic, Microspeleology, Pathogen, Phospholipase, Yeast

Citación: López-Caro, J., Daza-Castañeda, F., Espinoza-Téllez, S., Rodríguez-Bustos, A.M., Roa-Angulo, V., (2025). Actividad semicuantitativa patogénica de hongos presentes en las cuevas Las Moyas (La Calera) y La Chocoancia (Suesca), Cundinamarca, Colombia. *Boletín Geológico*, 52(1).

DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.52.1.2025.749>

Boletín Geológico: ISSN impreso: 0120-1425, ISSN electrónico: 2711-1318.



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Noviembre 18, 2024; Revisión recibida: Mayo 24, 2025; Artículo aceptado: Junio 4, 2025

1. INTRODUCCIÓN

Las cuevas se definen como formaciones naturales subterráneas, producto de procesos significativos de disolución de superficies rocosas, que pueden alcanzar hasta 1 kilómetro de profundidad desde la superficie terrestre (Cuezva, 2008). En Colombia, estos ecosistemas están protegidos por el Estado, conforme a la ley 2237 de 2022 del Congreso de Colombia, que los reconoce como patrimonio natural y cultural. Esta protección se debe a la fauna y flora única que albergan, así como a su adaptación a condiciones fisicoquímicas específicas de cada sitio (Zafra, 2021). Además, las cuevas poseen un valioso componente cultural, reflejado en los pictogramas y el arte rupestre, que representan aspectos artísticos de las culturas ancestrales (Northup y Boston, 2005).

Las cuevas y cavernas también representan un gran atractivo para la industria turística, ofreciendo oportunidades para el desarrollo económico de las regiones en las que se encuentran (Esco-bar, 2024). Este tipo de turismo, conocido como espeleoturismo, forma parte del turismo de aventura y se centra en la exploración de cavidades naturales, así como en la observación de la biodiversidad asociada a estos ecosistemas (Niño, 2021). En Colombia, esta actividad ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. Sin embargo, a pesar de la existencia de una ley que ampara estos ecosistemas, aún carece de una reglamentación específica que establezca lineamientos claros para la implementación del espeleoturismo con medidas de prevención de enfermedades. La falta de una regulación adecuada puede generar impactos negativos dentro de las cavidades, ya que el tránsito constante de turistas altera las condiciones naturales de estos ecosistemas únicos y de sus microorganismos.

Las cuevas albergan una biodiversidad altamente especializada, que incluye murciélagos, anfibios, peces y microorganismos, como hongos, todos adaptados a condiciones muy particulares de temperatura y humedad (Lasso, 2021). Cuando el espeleoturismo no se gestiona de manera responsable y sostenible, las actividades humanas pueden alterar estas variables, favoreciendo la proliferación de hongos a partir de la entrada de nuevos sustratos (residuos sólidos o desechos orgánicos), lo que pone en riesgo tanto la conservación del ecosistema como la experiencia de los visitantes (Niño, 2021).

Estas amenazas pueden provocar la destrucción del ecosistema y alterar el equilibrio geoquímico de las cuevas, promoviendo la pérdida de los hongos que habitan en estos sitios (Domínguez, 2014). Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue reconocer la diversidad de los organismos fúngicos presentes en las cuevas de Las Moyas (La Calera) y La Chocoancia

(Suesca), Cundinamarca, y determinar cuáles de estos podrían constituir una amenaza latente para el desarrollo del espeleoturismo.

1.1 Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en dos cuevas ubicadas en el departamento de Cundinamarca, Colombia (Figura 1): la cueva la Chocoancia, localizada en el municipio de Suesca ($5^{\circ} 6' 36,2''$ N; $73^{\circ} 45' 53,5''$ W), y la Cueva las Moyas, en el municipio de La Calera ($4^{\circ} 39' 40,7''$ N; $74^{\circ} 01' 06,8''$ W).

La selección de estas dos cuevas se basó en la afluencia de visitantes, siendo la primera de alta frecuencia y la segunda de acceso limitado, con una baja afluencia de visitantes. Este enfoque permitió evaluar el impacto del turismo espeleológico en la diversidad y actividad fúngica de las cuevas.

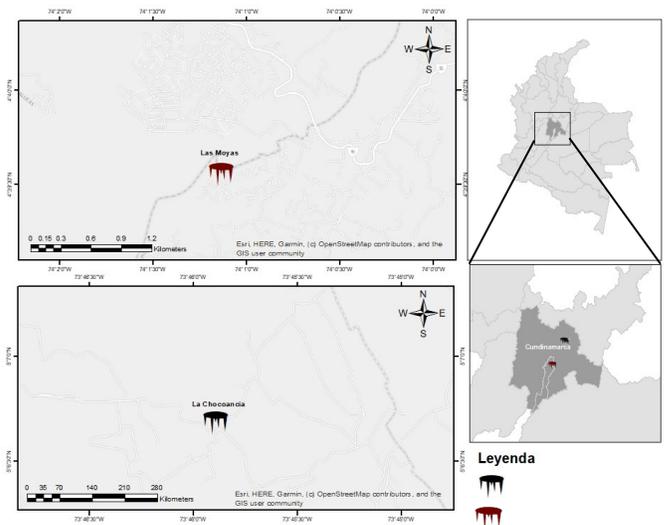


Figura 1. Mapa de las áreas de estudio: Cueva las Moyas y Cueva de la Chocoancia. Realizado en el software ArcMap.

2. MARCO GEOLÓGICO

La Cueva La Chocoancia, ubicada en el municipio de Suesca, tiene una longitud interna de 500 metros y se encuentra a 2772 msnm. En su interior, cuenta con un cuerpo de agua que fluye a lo largo de toda la cavidad. La fauna presente en la cueva incluye una gran variedad de vertebrados, tales como peces del género *Trichomycterus*, guácharos del género *Steatornis* y murciélagos de los géneros *Anoura*, *Artibeus* y *Myotis*, entre otros (Caballero et al., 2021). En cuanto al espeleoturismo, esta cueva está abierta al público desde hace más de 10 años, ofreciendo diversos servicios y planes de visita (Aventura Extrema, 2023).

La geología de la zona donde se ubica La Chocoancia está marcada por una falla geológica que atraviesa el área. Esta falla,

de tipo inverso, desplaza rocas más antiguas de la Formación Labor-Tierna sobre rocas más jóvenes de la Formación Guaduas. En algunas zonas, este fenómeno ha dado lugar a la formación de ciénagas de tracción, espacios donde se acumulan sedimentos provenientes de los ríos y glaciares de épocas pasadas. Esta dinámica tectónica ha facilitado la formación de cavidades como la cueva La Chocoancia (Reyes, 2004).

Por otro lado, La Cueva Las Moyas se encuentra en el municipio de La Calera, a 3090 msnm. A diferencia de La Chocoancia, esta cueva es más corta, con una longitud de 380 metros, pero también presenta un cuerpo de agua a lo largo de su cavidad. Su fauna incluye vertebrados como murciélagos del género *Anoura*, y se ha registrado la presencia de anfibios, tales como *Hyloscirtus bogotensis* y *Hyloxalus edwardsi* (Valdivieso y Quintana, 2021). En cuanto al espeleoturismo, esta cueva estuvo abierta al público hasta 2017, pero actualmente no está disponible para visitas, ya que se encuentra en un terreno privado.

La cueva se encuentra en la unidad litoestratigráfica de la Formación Labor y Tierna, en la plancha geológica 228 "Santafé de Bogotá Noreste" (Valdivieso y Quintana, 2021). La formación de la cavidad estuvo influenciada por la falla de Teusacá y un pequeño sinclinal (Valdivieso y Quintana, 2021).

Ambas cuevas están situadas en una región de alta pluviosidad y cuentan con la presencia de numerosos acuíferos subterráneos, lo que juega un papel crucial en la formación y evolución de estas cavidades. La infiltración de agua a través de las fisuras en las rocas provoca la continua disolución y expansión de las cavidades subterráneas. Este flujo de agua contribuye a la biodiversidad presente en ambas cuevas, creando un ambiente húmedo y constante que favorece el crecimiento de diversos microorganismos, incluyendo los hongos (Bermúdez y Velandia, 2002; Valdivieso y Quintana, 2021).

3. MÉTODO

Fase de campo. En esta fase inicial, se establecieron tres puntos de muestreo dentro de cada una de las cuevas estudiadas, La Chocoancia y Las Moyas, ubicados estratégicamente al inicio, la mitad y el final de cada cueva, siguiendo un patrón uniforme para ambas. En cada punto, se identificaron áreas de interés, como laderas rocosas y paredes, donde se aplicaron estrictas medidas antisépticas para evitar la contaminación, de acuerdo con los protocolos establecidos por Domínguez (2014). Las ubicaciones específicas de los puntos de muestreo dentro de la cueva Las Moyas se ilustran en el mapa de la Figura 2, que también sirvió como referencia para la distribución de los puntos en la cueva La Chocoancia. Las muestras recolectadas se conservaron a una temperatura de 4 °C, y se tomaron tres tipos de submuestras, cada

una en duplicado: (1) sustrato, incluyendo materia fecal, almacenada en frascos coprológicos estériles; (2) paredes, mediante la técnica de hisopado de superficies, siguiendo el método descrito por Porca (2011); y (3) agua, recolectada en frascos ámbar con tiosulfato sódico al 3% para neutralizar posibles bacterias (Figura 3).

Fase de siembra. En los laboratorios de Biología Aplicada y de Investigaciones de Biología (INBIBO) de la Universidad El Bosque, se prepararon los medios de cultivo específicos para las muestras recolectadas (Figura 4). Se utilizó Agar Dextrosa Papa (PDA) para las muestras de agua y guano, ya que este medio no reacciona con los compuestos usados en la recolección, como el tiosulfato de sodio y el Tween 80, sustancias empleadas en la recolección y separación de las muestras (Becton, 2015). Por otro lado, se utilizó Agar Dextrosa Sabouraud (SDA), suplementado con 0,5% de cloranfenicol para inhibir el crecimiento bacteriano, para el resto de las muestras (Liofilchem, 2015). Las siembras se realizaron mediante inoculación masiva, incubando las placas durante siete días a 20 °C (Figura 4).

Fase de determinación taxonómica. Tras la siembra, se realizó la caracterización de los aislamientos teniendo en cuenta características macroscópicas, microscópicas y metabólicas. El análisis macroscópico incluyó la evaluación de características como la coloración, forma, textura y estructuras visibles. Para el análisis microscópico, se utilizaron tinciones específicas como el azul de lactofenol para hongos filamentosos, azul de metileno para levaduras con el fin de identificar estructuras como esporas, conidióforos y hifas; y tinta china para evidenciar cápsulas en el género *Cryptococcus* sp. Para determinar el comportamiento metabólico se realizaron pruebas bioquímicas específicas. (Rivas, 2021).

Fase de pruebas patogénicas. Se seleccionaron once especies por su potencial patogénico y se sometieron a tres pruebas específicas para el reconocimiento de su actividad patogénica. La primera fue la actividad hemolítica, utilizando agar sangre para observar halos de lisis de glóbulos rojos y registrar la actividad hemolítica (Nayak et al., 2013). La segunda prueba evaluó el crecimiento radial, considerando la adaptabilidad térmica de los hongos mediante la comparación de su crecimiento en agar PDA a 28 °C y 37 °C (Molina et al., 2017). Finalmente, se evaluó la actividad fosfolipasa, utilizando agar con inclusión de yema de huevo para detectar la degradación de fosfolípidos a través de exoenzimas específicas (Echeverría et al., 2002).

Análisis estadístico. Para evaluar la diversidad y la correspondencia de especies entre los puntos de muestreo, se generó un dendrograma basado en el índice de correlación de Jaccard, considerando la presencia y ausencia de las especies, y verificando la

precisión mediante el coeficiente de correlación cofenético. Los resultados de las pruebas patogénicas se representaron mediante un dendrograma basado en un análisis de conglomerados, utilizando distancia euclidiana y el método del vecino más cercano, con verificación de la precisión mediante el coeficiente de correlación cofenético. El contraste del crecimiento de los hongos a diferentes temperaturas se realizó mediante un análisis multivariado permutado de la varianza (PERMANOVA) con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

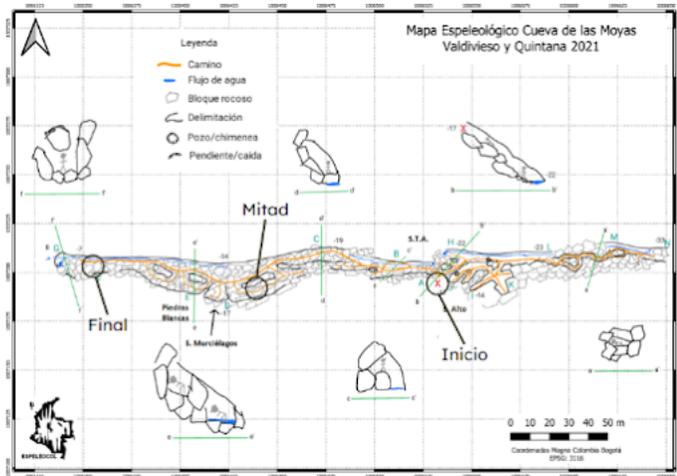


Figura 2. Mapa espeleológico de la Cueva las Moyas, donde se observan los puntos de muestreo; inicio, mitad y final. tomado de Valdivieso y Quintana (2021).



Figura 3. Toma de muestras al interior de la cueva. A. Agua. B. Paredes., C. Suelo. Foto: Juan López-Caro



Figura 4. Preparación, siembra y verificación de los medios de cultivo. A.. Materiales. B-C. Preparación medios de cultivo. D. Siembra por inoculación masiva, E. Medios de cultivo posterior a incubación. Foto: Ana Rodríguez-Bustos

4. RESULTADOS

En la cueva la Chocoancia se identificaron un total de 15 especies de hongos (Figura 5), pertenecientes a 11 géneros, de los

cuales se destacan las especies *Cryptococcus* cf. *neoformans*, *Fusarium* sp. 1, *Mucor* sp., *Rhizopus* sp., *Rhodotorula* cf. *mucilaginoso*, *Rhodotorula* cf. *slooffiae* y *Verticillium* sp. por su crecimiento en suelo, agua y paredes.

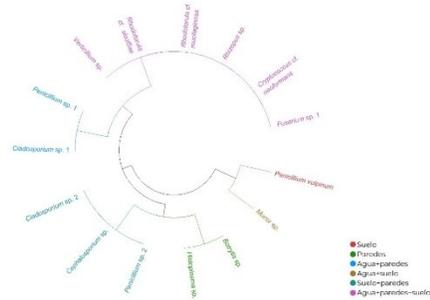


Figura 5. Dendrograma de acuerdo con la distancia de Jaccard con un coeficiente de correlación cofenético de $r=0,8169$ de la cueva la Chocoancia, realizado en el software RStudio.

Con respecto a la cueva las Moyas se identificaron un total de 13 especies (Figura 6), pertenecientes a 12 géneros, de las cuales *Cryptococcus* cf. *neoformans*, *Mucor* sp., *Rhodotorula* cf. *mucilaginoso* y *Rhodotorula* cf. *slooffiae* reportan su crecimiento en las 3 submuestras.

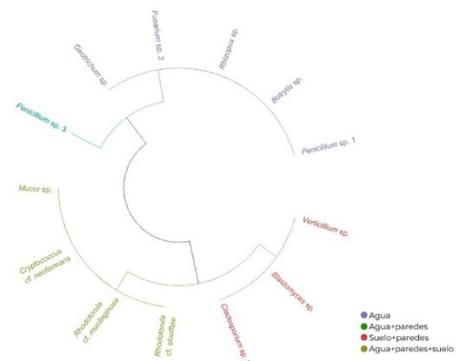


Figura 6. Dendrograma de acuerdo con la distancia de Jaccard con un coeficiente de correlación cofenético de $r=0,8949$ de la cueva las Moyas, realizado en el software RStudio.

En total, para ambas cuevas se reportaron 19 especies de hongos, de las cuales se seleccionaron y aislaron 11 especies (Figura 10 - Anexo 2), basándose en su potencial patógeno y la facilidad con la que los espeleoturistas pueden entrar en contacto con las submuestras, haciendo especial énfasis en las muestras de suelo y paredes. Las especies seleccionadas fueron: *Cladosporium* sp. 1, *Cladosporium* sp. 2, *Cryptococcus* cf. *neoformans*, *Histoplasma* sp., *Mucor* sp., *Penicillium vulpinum*, *Penicillium* sp. 2, *Penicillium* sp. 3, *Rhizopus* sp., *Rhodotorula* cf. *mucilaginoso* y *Rhodotorula* cf. *slooffiae*.

Los resultados de las pruebas realizadas a cada una de estas especies se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de especies de hongos con su actividad semicuantitativa patogénica.

Especie	Agar Sangre	Agar SDA a 28°C	Agar SDA a 37°C	Agar Huevo
<i>Cladosporium</i> sp. 1	γ	9,0	1,2	+
<i>Cladosporium</i> sp. 2	β	1,9	1,3	+
<i>Cryptococcus</i> cf. <i>neoformans</i>	α	0,5	0,2	-
<i>Histoplasma</i> sp.	α	9,0	2,0	-
<i>Mucor</i> sp.	α	1,3	-	+
<i>Penicillium vulpinum</i>	α	2,0	0,8	+
<i>Penicillium</i> sp. 2	γ	2,2	1,7	-
<i>Penicillium</i> sp. 3	β	1,1	-	+
<i>Rhizopus</i> sp.	β	9,0	1,7	+
<i>Rhodotorula</i> cf. <i>mucilaginosa</i>	β	1,4	0,5	+
<i>Rhodotorula</i> cf. <i>slooffiae</i>	α	1,2	0,5	+

En cuanto a las pruebas realizadas, la actividad hemolítica se presentó de tres maneras distintas (Figura 7): α (alfa) o parcial en seis especies, β (beta) o total en cuatro especies, y γ (gamma) o sin hemólisis en dos especies. En cuanto al crecimiento radial, se observó el crecimiento a 28 °C de todas las especies aisladas; sin embargo, a 37 °C no se registró crecimiento de *Mucor* sp. y *Penicillium* sp. 3 (Figura 8). Por otro lado, la actividad fosfolipasa se evaluó mediante la inspección visual de un halo blanco en el medio de cultivo (Figura 7), donde *Cryptococcus* cf *neoformans*, *Histoplasma* sp. y *Penicillium* sp. 2 no mostraron resultados positivos.

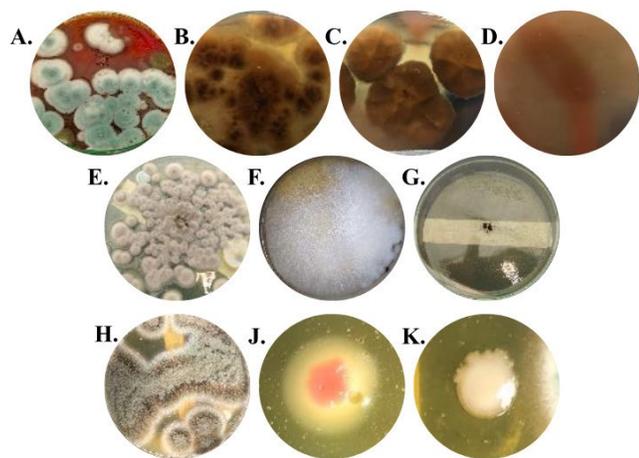


Figura 7. Fotografías macroscópicas de las tres pruebas en los tres diferentes medios de cultivo. A: Agar Sangre, B: Hemólisis alfa, C: Hemólisis beta, D: Hemólisis gamma, E: Agar PDA, F: Crecimiento radial a 28 °C, G: Crecimiento radial a 37 °C, H: Agar de huevo, I: Positivo, J: Negativo. Fotos: Juan López-Caro

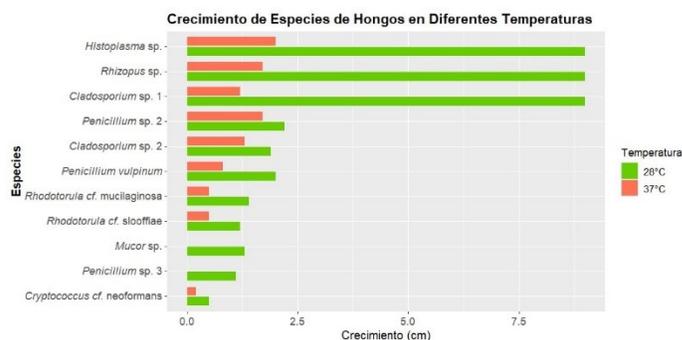


Figura 8. Crecimiento radial de las especies de hongos a 29 °C y 37 °C en agar PDA, realizado en el software RStudio. P<0.05

Adicionalmente, se presenta la relación de cada prueba mediante distancia euclidiana para la identificación de las especies más peligrosas (Figura 9). Los hongos con mayor potencial patógeno son las levaduras *Rhodotorula* cf *mucilaginosa* y *Rhodotorula* cf *slooffiae*, así como los hongos filamentosos *Rhizopus* sp., *Cladosporium* sp. 2 y *Penicillium vulpinum*, los cuales se encuentran presentes en ambas cuevas, a excepción de *Penicillium vulpinum*, que es exclusivo de La Chocoancia. Asimismo, se resalta la presencia exclusiva de otras especies, como *Histoplasma* sp., *Penicillium* sp. 2 y *Cladosporium* sp. 1 en la cueva La Chocoancia. Del mismo modo, *Penicillium* sp. 3 es exclusivo de la cueva Las Moyas.

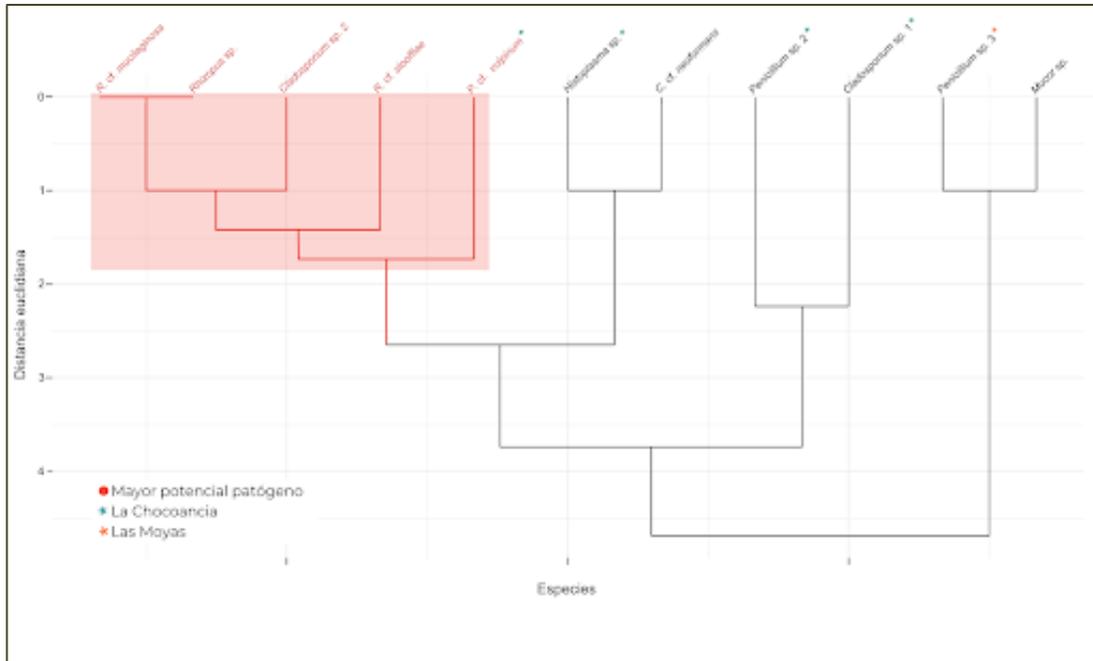


Figura 9. Dendrograma por análisis de conglomerados con distancia euclidiana aplicando el método del vecino más cercano con un coeficiente de correlación cofenético de $r= 0.8685$ para la actividad patógena de los hongos, realizado en el software RStudio.

5. DISCUSIÓN

Comparando nuestros resultados con estudios previos, encontramos similitudes con investigaciones realizadas en otras regiones. En el estudio de Ruiz (2017) sobre las cuevas de la zona central de México, se identificaron dos géneros de hongos patógenos comunes con los encontrados en nuestro estudio: *Cladosporium* e *Histoplasma*. En particular, la especie *Histoplasma capsulatum* se asocia con las colonias de murciélagos en las cuevas, ya que este hongo se beneficia de las condiciones ambientales óptimas que estas cavidades proporcionan, como temperatura, humedad y nutrientes provenientes de los excrementos de los murciélagos (Ruiz, 2017).

De manera similar, el estudio de Domínguez (2014) en cuevas andaluzas identificó los géneros *Cladosporium*, *Penicillium* y *Verticillium*, destacando la presencia de *Cladosporium* cladosporioides, que se asocia con vegetación en descomposición en suelos de las cavidades. Este género se ha descrito como fitopatógeno, y su presencia en cuevas sugiere un vínculo con los residuos orgánicos en descomposición presentes en estos ecosistemas (Domínguez, 2014).

Entre las especies patógenas de interés para la salud pública que encontramos en este estudio se encuentran *Histoplasma* sp., causante de la histoplasmosis pulmonar (Panizo et al., 2005); *Rhodotorula cf slooffiae* y *Rhodotorula cf mucilaginosa*, asociadas con rodotorulosis sistémica (Tuon y Costa, 2008); *Cryptococcus cf neoformans*, responsable de la criptococosis, una micosis pulmonar oportunista (Velagapudi et al., 2009); y las especies de *Cladosporium*, implicadas en infecciones cutáneas y afecciones al sistema nervioso central, como cromoblastomicosis y feohifom

micosis (Garnica.Escamilla, 2012). Estas infecciones son comunes en personas inmunosuprimidas, pero también pueden afectar a individuos sanos expuestos a estas especies en ambientes como las cuevas.

La actividad hemolítica es un factor clave en la patogenicidad de hongos, ya que se asocia con la presencia de proteínas de plegamiento en lámina beta, localizadas en la pared celular, las cuales permiten la interacción con ligandos específicos en células diana. En este caso, las hemolisinas tienen como objetivo principal a los eritrocitos, ya que estas proteínas forman poros en las membranas celulares, lo que provoca la liberación de hierro contenido en los glóbulos rojos al medio extracelular.

Este proceso es esencial para el crecimiento fúngico, dado que el hierro actúa como cofactor en varios procesos metabólicos y bioquímicos (Vesper y Vesper, 2004; Nayak et al., 2013). La capacidad hemolítica de ciertos hongos también ha sido considerada una estrategia de supervivencia durante infecciones oportunistas, ya que les permite obtener nutrientes esenciales para su crecimiento en condiciones adversas (Nayak et al., 2013).

El crecimiento radial a diferentes temperaturas proporciona información sobre las condiciones óptimas para el desarrollo de los hongos. En nuestro estudio, todas las especies aisladas mostraron crecimiento a 28 °C, aunque a 37 °C *Mucor* sp. y *Penicillium* sp. 3 no registraron crecimiento (Figura 9). Esta capacidad de crecimiento a 37 °C es relevante, ya que se corresponde con la temperatura corporal promedio de los animales, lo que facilita la invasión de superficies epiteliales, endoteliales y vasos sanguíneos.

Además, a esta temperatura se activan genes específicos que codifican proteínas asociadas con mecanismos invasivos (Molina et al., 2017; Rementería et al., 2005). En este sentido, la temperatura corporal humana es un factor determinante para el

potencial patogénico de los hongos, ya que la capacidad de crecer a 37 °C les permite adaptarse y proliferar en el organismo huésped. En particular, *Cryptococcus* cf *neoformans* y otros hongos que producen esporas pequeñas (entre 2-10 µm) pueden fácilmente penetrar los alvéolos pulmonares tras la inhalación, lo que es un factor de riesgo en ambientes como las cuevas, donde las concentraciones de esporas pueden ser altas. Se ha reportado que, con solo 465 esporas, *C. neoformans* puede causar infecciones graves (Vegalapudi et al., 2009).

De manera similar, *Cladosporium* sp. 1, *Histoplasma* sp. y *Rhizopus* sp., que producen esporas pequeñas (≤ 15 µm), tienen el potencial de generar infecciones graves en personas expuestas a altas concentraciones de esporas en el aire, como podría ocurrir con los turistas en estos ecosistemas subterráneos (Cozad y Furcolow, 1953; Thompson, 1986; Damialis et al., 2014).

La actividad fosfolipasa se refiere a la capacidad de ciertos hongos para producir exoenzimas que hidrolizan los fosfolípidos presentes en las membranas celulares de sus hospedadores, lo cual facilita la invasión y las infecciones sistémicas. En nuestro estudio, más del 50% de las especies aisladas mostraron actividad fosfolipasa positiva, incluidos *Rhodotorula* cf *slooffiae* y *Rhodotorula* cf *mucilaginoso* (levaduras) y *Rhizopus* sp., *Penicillium* sp. 3, *Mucor* sp., *Penicillium vulpinum* y *Cladosporium* spp. (hongos filamentosos). Este hallazgo es indicativo de que estas especies tienen la capacidad de invadir tejidos y células del huésped, como los turistas que ingresan a las cuevas, aumentando así el riesgo de infección (Panizo et al., 2005).

En Colombia, las formaciones kársticas no solo representan un invaluable patrimonio geológico y biológico, sino que también se destacan como un atractivo escénico único que impulsa el desarrollo del espeleoturismo. Este fenómeno ha convertido a las formaciones kársticas en motores clave para el desarrollo económico de las comunidades locales dando bienestar económico y preservación de estos ecosistemas, haciendo del espeleoturismo una actividad de alto valor para las regiones con este tipo de formaciones (Estepa, 2021).

En este contexto, los operadores turísticos juegan un rol crucial, pues asumen una doble responsabilidad: garantizar la seguridad de los visitantes, especialmente en términos de la salud pública, y proteger la integridad de las personas que desarrollan estas actividades. En la mayoría de los casos, estos operadores deben proporcionar a los turistas los equipos esenciales de seguridad, tales como cascos, linternas, cuerdas y otros dispositivos necesarios para minimizar los riesgos inherentes a la exploración de las cuevas (Valdivieso, 2019). Sin embargo, el creciente número de visitantes y la intensificación del espeleoturismo generan nuevos desafíos en la proliferación microbiana y contaminación de los operadores.

Los hallazgos de nuestro estudio adquieren una relevancia crucial, ya que representan uno de los primeros esfuerzos en Colombia por identificar microorganismos patógenos en las formaciones kársticas utilizadas para actividades de espeleoturismo. Este aporte pionero amplía considerablemente el conocimiento sobre la microbiota de estos ecosistemas subterráneos y destaca los riesgos sanitarios que estos microorganismos pueden representar para la salud de los visitantes y los guías que frecuentan estas áreas. La presencia de agentes patógenos en el ambiente subterráneo pone en evidencia la necesidad urgente de adoptar

medidas de control y manejo de riesgos más estrictas, particularmente en términos de bioseguridad.

Es fundamental fortalecer las estrategias de manejo propuestas en la Norma Técnica Colombiana NTC 947-1 (ICONTEC, 2018), que establece los lineamientos para la seguridad en las actividades de espeleoturismo. En este sentido, es imperativo implementar planes de gestión de riesgos que subrayen la importancia de adoptar medidas adicionales de bioseguridad.

Entre estas medidas, se incluyen protocolos de desinfección rigurosos para el personal antes y después de su ingreso a las cuevas, la provisión de equipo de protección adecuado (guantes, mascarillas, gafas de seguridad), así como la capacitación en el manejo de riesgos biológicos para todos los involucrados en estas actividades. Además, resulta imprescindible el establecimiento de controles periódicos de salud para los operadores turísticos, lo que permitiría detectar y prevenir posibles afecciones derivadas de la exposición prolongada a microorganismos patógenos presentes en el ambiente subterráneo.

La implementación de estas medidas no solo contribuiría a mitigar los riesgos asociados con la exposición a patógenos, sino que también fomentaría el desarrollo de estrategias de conservación efectivas. Las formaciones kársticas son ecosistemas de alto valor ecológico y económico, que albergan una biodiversidad única y que, por tanto, requieren de esfuerzos constantes para su protección y conservación. Es esencial que la gestión de estos ecosistemas esté estrechamente vinculada a la protección de la salud de las personas que visitan o trabajan en ellos con un enfoque desde el espeleoturismo

6. CONCLUSIONES

En este estudio se identificaron 19 morfoespecies de hongos en las cuevas La Chocoancia y Las Moyas, de las cuales 10 fueron consideradas como potenciales patógenos para la salud humana. Las pruebas de actividad hemolítica, fosfolipasa y crecimiento radial revelaron características patogénicas que representan un riesgo para los espeleoturistas y personal relacionado. De las cinco especies con mayor actividad patógena las cuales son *Rhodotorula* cf *slooffiae*, *Rhodotorula* cf. *mucilaginoso*, *Rhizopus* sp, *Cladosporium* sp 2, *Penicillium vulpinum*, de esas cinco, cuatro se hallaron en ambas cuevas, mientras que la última fue exclusiva de La Chocoancia, la cual mostró una mayor diversidad de hongos patógenos que Las Moyas.

Este estudio destaca la necesidad de fortalecer las medidas de bioseguridad en el espeleoturismo, incluyendo protocolos de desinfección y protección para mitigar los riesgos a la salud. Se subraya la importancia de un manejo adecuado de estos ecosistemas para equilibrar su conservación con la seguridad de los visitantes.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

RECONOCIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros agradecimientos al Geólogo Alexander Piragua (Proyecto Paleozoico Servicio Geológico Colombiano) quien fue el encargado de recuperar y seleccionar los fragmentos con macrofauna analizados. Agradecemos a Dr. J.L. Benedetto por su asistencia en la determinación del braquiópodo rinconélido. Además, queremos agradecer a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

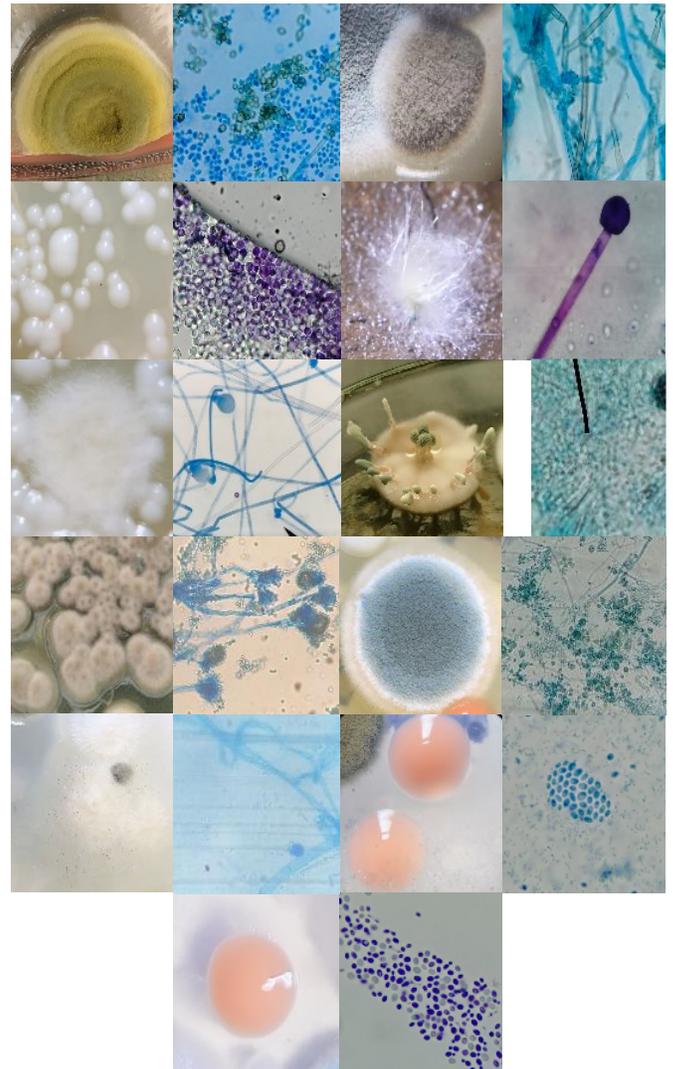
Anexo 1.

Especie	Suelo	Paredes	Agua
<i>Blastomyces</i> sp.	M	M	-
<i>Botrytis</i> sp.	-	C	M
<i>Cephalosporium</i> sp.	C	C	-
<i>Cladosporium</i> sp. 1	C	-	C
<i>Cladosporium</i> sp. 2	C/M	C/M	-
<i>Cryptococcus</i> cf. <i>neoformans</i>	C/M	C/M	C/M
<i>Fusarium</i> sp. 1	C	C	C
<i>Fusarium</i> sp. 2	-	-	M
<i>Geotrichum</i> sp.	-	-	M
<i>Histoplasma</i> sp.	-	C	-
<i>Mucor</i> sp.	C/M	M	C/M
<i>Penicillium vulpinium</i>	C	-	-
<i>Penicillium</i> sp. 1	-	C	C/M
<i>Penicillium</i> sp. 2	C	C	-
<i>Penicillium</i> sp. 3	-	-	M
<i>Rhodotorula</i> cf. <i>mucilaginoso</i>	C/M	C/M	C/M
<i>Rhodotorula</i> cf. <i>slooffiae</i>	C/M	C/M	C/M
<i>Verticillium</i> sp.	C/M	C/M	C

La Chocoancia (C)

Las Moyas (M)

Anexo 2.



Fotografías macroscópicas y microscópicas de los hongos obtenidos en las cuevas. A-B. *Cladosporium* sp. 1. C-D. *Cladosporium* sp. 2. E-F. *Cryptococcus* neoformans. G-H. *Histoplasma* sp. . I-J. *Mucor* sp. . K-L. *Penicillium vulpinum*. M-N. *Penicillium* sp. 2. O-P. *Penicillium* sp. 3, Q-R. *Rhizopus* sp. . S-T. *Rhodotorula* cf *mucilaginoso*. U-V. *Rhodotorula* cf *slooffiae*. Foto: A-L Samuel Espinosa-Téllez, K-V Felipe Daza-Castañeda.

7. REFERENCIAS

Acosta, J. y Ulloa, C. (2002). Mapa geológico del departamento de Cundinamarca. Instituto de investigación e información geocientífica. Minero ambiental y nuclear ingenierías.

Aventura Extrema. (2023). Cueva de Chocoancia en Suesca, Cundinamarca. Aventura Extrema Suesca.

Becton. (2015). BBL Sabouraud Dextrose Agar. Becton, Dickinson and Company. <https://www.bd.com/resource.aspx?IDX=22894#:~:text=Sabouraud%20Dextrose%20Agar%20>

- Bermúdez, O., y Velandia, F. (2002). Modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá. Ministerio de minas y energía Ingeominas.
- Caballero, S., Martinelli, D., y Lasso, C. (2021). Diversidad de vertebrados en ecosistemas subterráneos de Colombia a partir de análisis de ADN ambiental. Memorias II Congreso Colombiano de Espeleología. ISSN: 2745-2972.
- Cozad, G., y Furcolow, M., (1953). Laboratory studies of *Histoplasma capsulatum*: II. Size of the spores. Oxford University Press. The Journal of infectious Diseases, Vol. 92 N° 1, pp. 77-84. <https://www.jstor.org/stable/30092302>
- Cuezva, S. (2008). Dinámica microambiental de un medio Kárstico somero (cueva Altamira, Cantabria): microclima , geomicrobiología y mecanismos de interacción cavidad/ exterior. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España
- Damialis, A., Mohammad, A., Halley, J., Gange, A. (2014). Fungi in a changing world: growth rates will be elevated, but spore production may decrease in future climates. *Int J Biometeorol.* 59:1157-1167. Doi: 10.1007/s00484-014-0927-0
- Domínguez, I. (2014). Evaluación y control de comunidades microbianas en cuevas turísticas. Universidad de Sevilla.
- Echeverría, A., Durante, A. G., Arechavala y Ricardo Negroni, A. (2002). Estudio comparativo de dos medios de cultivo para la detección de la actividad fosfolipasa en cepas de *Candida albicans* y *Cryptococcus neoformans*. [Reviberoammicol.com. https://www.reviberoammicol.com/2002-19/095098.pdf](https://www.reviberoammicol.com/2002-19/095098.pdf)
- Escobar, M. P. (2024). Recomendaciones para promover un turismo espeleológico con sostenibilidad ambiental según los criterios para el Turismo Sostenible de Global Sustainable Tourism Council (GSTC), sección D; en la cueva Chocoancia, Suesca Cundinamarca [Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/68349>
- Estepa-Niño, L. A. (2021). Plan estratégico para el desarrollo de un destino de espeleoturismo: caso El Peñón, Santander.
- Garnica-Escamilla, M. A., Rocha, M. G., Bautista-León, R. C., & Franco-Cendejas, R. (2012). El paciente quemado. Recuperado 24 de mayo de 2025, de Medigraphic.com website:
- ICONTEC. (2018). Norma técnica NTS-TC sectorial 001: Esquemas de tiempo compartido turístico y programas de propiedad vacacional. Requisitos del servicio de comercialización y de la gestión del servicio postventa (1ª ed.). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Liofilchem. (2015). Czapek Dox Agar. Liofilchem s.r.l.
- Lasso Alcalá C, Quintana Vargas A (2021). Fauna asociada (endocáptica) a cuevas en el municipio de El Peñón, Santander - Proyecto Colombia BIO.
- Molina, A., Borrego, S., y Ortega, D. (2017). Potencialidades biodeteriorantes y patogénicas de hongos anemófilos ambientales frecuentes en ambiente de archivos
- Nayak, A., Green, B., y Beezhold, D. (2013). Fungal hemolysins. *Medical Mycology*, 51, 1-16. DOI: 10.3109/13693786.2012.698025.
- Niño, L. (2021). Plan estratégico para el desarrollo de un destino de espeleoturismo: Caso El Peñón, Santander [Universidad Externado de Colombia].
- Northup, D. E., & Boston, P. J. (2005, October). Microbial speleology: opportunities and challenges. In National Cave and Karst Management Symposium. Anais.
- Panizo, M., Reviákina, V., Flores, Y., Montes, W., y González, G. (2005). Actividad de fosfolipasas y proteasas en aislados clínicos de *Candida* spp. *Boletín Sociedad Venezolana de Microbiología*, 25 (2), 64–71.
- Porca, E. (2011). Aerobiología: mecanismos de dispersión de los microorganismos en cuevas turísticas.
- Rementería, A., López, N., Ludwig, A., Vivanco, A., Bikandi, J., Pontón, J., & Garaizar, J. (2005). Genes y moléculas implicados en la virulencia de *Aspergillus fumigatus* Genes and molecules involved in *Aspergillus fumigatus* virulence. *Revista Iberoamericana de Micología*. 22(1), 1-23.
- Reyes-Torres, G. (2004): Modelo estructural al norte de la Sabana de Bogotá mediante la integración de información geológica, magnetométrica y de teledetección.- *GEOLOGÍA COLOMBIANA*, 29, pp. 3-9, 8 Figs., Bogotá.
- Rivas Zuniga S. C. G. A. (2021). Manual práctico de microbiología básica. Colombia: Editorial Universidad del Cauca.
- Ruiz, O. (2017). Presencia de hongos patógenos en cuevas de la zona central del valle de México. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000754947>
- Thompson, D., (1986). Effect of essential oils on spore germination of *Rhizopus*, *Mucor* and *Aspergillus* Species. *Mycologia*, 78:3, 482-485. Doi: 10.1080/00275514.1986.12025274
- Valdivieso, B. & Quintana, G. (2021). Actualización cartográfica y espeleológica de la Cueva, las Moyas, Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Valdivieso, B. (2019). Análisis del potencial turístico de la región cársica del municipio de El Peñón, Santander (Doctoral dissertation).
- Velagapudi, R., Hsueh, Y., Boyer, S. (2009). Spores as infectious propagules of *Cryptococcus neoformans*. *Duke University Medical Center*. Vol. 77, N° 10. Doi: 10.1128/IAI.00542-09
- Vesper, S. J., & Vesper, M.J. (2002). Stachylysin may be a cause of hemorrhaging in humans exposed to *Stachybotrys chartarum*. *Infect Immun*, 70, 2065 – 2069.
- Zafra, D. O. (2021). Propuesta para la Conservación de Cuevas y Cavernas en la Región Andina de Colombia. Researchgate.net.
- Zhou, Z. Q., Li, J. S. y Qu, X. G. (1982). Trilobita. In *Palaeontological Atlas of Northwest China, Shaanxi-Gansu-Ningxia Volume (1): Precambrian - Lower Palaeozoic* (pp. 215–294). Geological Publishing House, Beijing. [In Chinese]