CONSERVAR PATRIMÓNIO

ARTÍCULO / ARTIGO / ARTICLE

Diversidad y patogenicidad potencial de hongos microscópicos en el Parque Museo Arqueológico de Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Diversidade e potencial patogenicidade de fungos microscópicos no Parque Museu Arqueológico de Tunja da Universidade Pedagógica e Tecnológica da Colômbia

Diversity and potential pathogenicity of microscopic fungi in the Archaeological Museum Park of Tunja at the Pedagogical and Technological University of Colombia

ANA YERVID RODRÍGUEZ SÁENZ [1]
BERNARDO MELÉNDEZ ÁLVAREZ [1*]
PEDRO MARÍA ARGÜELLO GARCÍA [2]

1. Grupo de investigación atención primaria en salud, Facultad Ciencias de la Salud, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Calle 24 No 5-63, Antiguo Hospital San Rafael, Colombia
2. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Colombia

bernardo.melendez@uptc.edu.co

Resumen

Este estudio evaluó la diversidad de hongos microscópicos en dos espacios del Parque Museo Arqueológico de Tunja (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), con el objetivo de analizar su posible impacto sanitario y su capacidad de biodeterioro sobre materiales patrimoniales. Se recolectaron 50 muestras de aire, superficies, restos bioantropológicos y cerámica, cultivadas en agar Sabouraud con cloranfenicol (0,05 g/L) e incubadas a 25 °C. Mediante análisis macroscópicos y microscópicos se identificaron 20 géneros de hongos y levaduras, predominando *Penicillium* (26,9 %), *Cladosporium* (15.6 %), *Fusarium* (14,4 %) y *Mucor* (5,4 %). Estos géneros han sido reportados en la literatura por su asociación tanto en procesos infecciosos como con la degradación de materiales. Los resultados evidencian un riesgo potencial dual, sanitario y de conservación, que sustenta la necesidad de implementar estrategias de monitoreo y control ambiental orientadas a la protección de la salud y del patrimonio cultural.

PALABRAS-CLAVE
Identificación de hongos
Biodeterioro
Diversidad fúngica
Conservación museológica
Riesgo patógeno

Resumo

Este estudo avaliou a diversidade de fungos microscópicos em dois espaços do Parque Museu Arqueológico de Tunja (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), com o objetivo de analisar o seu possível impacto sanitário e a sua capacidade de biodeterioração sobre materiais patrimoniais. Foram recolhidas 50 amostras de ar, superfícies, restos bioantropológicos e cerâmica, cultivadas em agar Sabouraud com cloranfenicol (0,05 g/L) e incubadas a 25 °C. Por meio de análises macro e microscópicas, foram identificados 20 géneros de fungos e leveduras, com predominancia de *Penicillium* (26,9%), *Cladosporium* (15,6%), *Fusarium* (14,4%) e *Mucor* (5,4%). Estes géneros têm sido referidos na literatura pela sua associação tanto a processos infeciosos como à degradação de materiais. Os resultados evidenciam um risco potencial duplo, sanitário e de conservação, que sustenta a necessidade de implementar estratégias de monitorização e controlo ambiental orientadas para a proteção da saúde e do património cultural.

PALAVRAS-CHAVE
Identificação fúngica
Biodeterioração
Diversidade fúngica
Conservação de museus
Risco patogénico

Abstract

This study assessed the diversity of microscopic fungi in two areas of the Archaeological Museum Park of Tunja, (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), aiming to anlyze their potential impact on human health and their capacity to cause biodeterioration of heritage materials. A total of 50 samples were collected from air, surfaces, bioanthropological remains, and ceramic objects. These samples were cultured on Sabouraud agar with chloramphenicol (0,05 g/L) and incubated at a temperature of 25 °C. Macroscopic and microscopic analyses identified 20 genera of fungi and yeasts, with *Penicillium* (26,9 %), *Cladosporium* (15,6 %), *Fusarium* (14,4 %), and *Mucor* (5,4 %) being the most prevalent. These genera have been reported in the literature for their association with both infectious processes and material degradation. The findings indicate a dual potential risk, sanitary and conservation-related, highlighting the need to implement monitoring and environmental control strategies to protect both public health and culture heritage.

KEYWORDS
Fungal identification
Biodeterioration
Fungal diversity
Museum conservation
Pathogenic risk

Introducción

La sede central de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia se ubica sobre un significativo y excepcional sitio arqueológico conocido como el Cercado Grande de los Santuarios. Este yacimiento fue un lugar de importancia política y ritual, habitado entre el año 200 AEC y el 1532 EC [1-2]. Los restos arqueológicos excavados desde finales del siglo pasado se cuentan por miles y se han depositado en los laboratorios y bodegas adscritos al Parque Museo Arqueológico de Tunja. Dos de las colecciones arqueológicas más relevantes, por su singularidad y cantidad, corresponden a los restos óseos humanos y las vasijas de cerámica con potencial museográfico. La primera se compone de aproximadamente 400 individuos y la segunda de varias decenas de piezas.

Los hongos, organismos ampliamente distribuidos, son capaces de prosperar en una variedad de climas y suelos, incluso en entornos extremos. Su presencia se ve influenciada por factores como la contaminación, las condiciones de humedad, la temperatura y la actividad humana. Estos factores pueden favorecer la propagación de esporas fúngicas en espacios interiores, lo que, en casos significativos, puede resultar en el deterioro de los objetos arqueológicos y en problemas de salud [3-6].

Los hongos son considerados como uno de los principales agentes de deterioro de los objetos arqueológicos [7-9]. Tienen capacidad de alterar de forma considerable materiales orgánicos e inorgánicos. El término "biodeterioro" se utiliza comúnmente para describir la descomposición de materiales culturales, históricos y antropológicos causada por agentes biológicos [10-11]. Sin embargo, los impactos negativos del biodeterioro han sido subestimados debido a la falta de investigaciones sobre los mecanismos involucrados [12]. En este sentido, los hongos y los insectos representan las principales amenazas para los museos y las colecciones de valor histórico [13].

La presencia de hongos en espacios museográficos e instituciones de interés patrimonial constituye un problema relevante tanto para la conservación de las colecciones como para la salud de los trabajadores y visitantes debido a su capacidad de colonizar materiales orgánicos e inorgánicos y de dispersar esporas potencialmente alergénicas o patógenas. En investigaciones relacionadas con el tema, la micobiota contaminante se ha estudiado mayoritariamente desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo [7, 14].

La exposición de los trabajadores durante la jornada laboral a gran cantidad de esporas fúngicas puede causarles reacciones alérgicas, asma, queratitis, micosis oportunistas y otras enfermedades ocupacionales mediadas por diversos factores de virulencia propios de cada género fúngico [15-16]. En el estudio realizado por Zielinska-Jankiewicz et al. [17], 12 especies fueron consideradas potencialmente patógenas para los humanos: 8 de ellas presentaban propiedades alérgicas y 11 presentaban propiedades tóxicas; estos hallazgos han sido confirmados y ampliados por revisiones más recientes que destacan su impacto en la conservación patrimonial como en la salud humana [14, 18].

Las micotoxinas, incluso en bajas concentraciones, provocan trastornos gastrointestinales, daños en el sistema hematopoyético y genital junto a síntomas inespecíficos (astenia y náuseas) similares a los relacionados con el síndrome del edificio enfermo [20].

Un estudio realizado por Wiszniewska en 2009, concluyó que el 30 % de los empleados del museo estaban sensibilizados a al menos uno de los alérgenos fúngicos probados y que la prevalencia de síntomas alérgicos entre los sujetos era relativamente alta y frecuentemente relacionada con enfermedades específicas [15].

En Colombia, los trabajos sobre microbiota en museos y colecciones patrimoniales se concentran en contextos específicos [11], lo que evidencia la necesidad de ampliar la investigación en otros espacios museográficos. La presente investigación tiene como objetivo determinar la presencia de hongos microscópicos en aire, superficies, restos bioantropológicos y objetos de cerámica, pertenecientes al Parque Museo Arqueológico de Tunja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a través de su aislamiento e identificación.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el Parque Museo Arqueológico de Tunja, perteneciente a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Este estudio observacional descriptivo de corte transversal evaluó la diversidad y dominancia de hongos mediante el análisis de 50 unidades de muestreo recolectadas en dos recintos del museo. El primer espacio fue el Laboratorio de Osteología, donde se conservan restos óseos humanos de época prehispánica, y el segundo, el Área de Reserva, que alberga vasijas de cerámica. Las muestras se obtuvieron de diversas superficies, incluyendo el piso, las paredes, el aire, restos bioantropológicos y los objetos de cerámica.

Para la obtención de muestras de la superficie de las paredes y el piso se delimitaron áreas y se colocaron marcos de cuadrados de cartón cartulina de 5 × 5 cm, lo que generó una superficie de 25 cm^2 en cada área seleccionada. Las muestras se tomaron utilizando hisopos estériles humedecidos con solución de cloruro de sodio al 0,85 %. Posteriormente, estas muestras se sembraron en agar Sabouraud con cloranfenicol (0,05 g/L). Las muestras en los dos espacios se colectaron según la técnica del cuadrado, modificada por los investigadores [21].

Para el muestreo del aire, se utilizó el método pasivo o gravimétrico de sedimentación de cajas de Petri, el cual permite llevar los microorganismos presentes en el aire a la superficie del medio sólido para su cultivo [22]. En el Laboratorio de Osteología, se realizaron seis muestreos en diferentes áreas (dos en la parte superior, dos en la parte media y dos en la parte inferior) que carecían de corrientes de aire. En el Área de Reserva, se realizaron cuatro muestreos (uno en la parte superior, dos en la parte media y uno en la parte inferior), también sin corrientes de aire. Este método consistió en dejar destapada una caja de Petri con agar Sabouraud con cloranfenicol (0,05 g/L) durante 30 minutos en las áreas seleccionadas [23].

Las cajas se llevaron a incubar a temperatura de 25 °C durante dos semanas. Una vez finalizado el periodo de incubación, se procedió al conteo de unidades formadoras de colonia (UFC/m^3) de hongos por metro cúbico de aire. Este conteo se realizó de acuerdo con la fórmula propuesta por Omeliansky: $N = 5a \times 10^4 (bt)^{-1}$ [24].

En cuanto a las muestras de vasijas de cerámica y restos bioantropológicos, se seleccionaron según el criterio de inclusión basado en la presencia de signos de visibles de biodeterioro, tales como manchas, eflorescencias, micelio superficial, cambios de coloración y desprendimiento de material [7, 10]. La toma de muestras se realizó mediante un raspado aséptico de las áreas con indicadores de crecimiento en diferentes puntos de las piezas. Estas muestras también se sembraron en agar Sabouraud con cloranfenicol (0,05 g/L).

Las muestras sembradas se incubaron a temperatura de 25 °C durante dos semanas. Tras este período de incubación, se llevaron a cabo evaluaciones macroscópicas y microscópicas de las colonias de hongos, teniendo en cuenta características como pigmentación, presencia de hifas aéreas, plegamientos, textura y tamaño del cultivo a nivel macroscópico. Para la descripción morfológica microscópica, con el fin de determinar el género del morfotipo aislado, se realizó un examen de las muestras empleando hidróxido de potasio (KOH al 10 %) y azul de lactofenol. Para las levaduras, se realizó la prueba de tubo germinal con el fin de determinar la presencia o no de *Candida* sp. Además, de manera complementaria se usó la coloración de Gram para la observación general de levaduras, sin fines taxonómicos [25]. Estas evaluaciones microscópicas se realizaron utilizando un microscopio óptico con objetivos de 10× y 40×. La identificación de los géneros fúngicos se realizó mediante claves morfológicas de identificación descritas por Hoog et al [26]. Posteriormente se procesaron los datos y se calcularon los índices de diversidad (Shannon) y de dominancia (Simpson) para los diferentes tipos de muestra y para cada recinto del museo [18, 27]. La Tabla 1 presenta las muestras tomadas de acuerdo con el lugar del museo, la zona de muestra y la cantidad tomada.

La clasificación del potencial patogénico y de biodeterioro se realizó con base en la evidencia reportada en la literatura especializada.

Tabla 1. Descripción de los sitios de muestreo.

Sitio	Zona del muestreo	Número de muestras
Laboratorio de Osteología	Aire	6
	Pared	6
	Objetos	12
	Cráneos	6
	Piso	2
Área de reserva	Aire	4
	Pared	5
	Objetos	5
	Piso	4

Análisis estadístico

El procesamiento y análisis de los datos se realizó con el software R, utilizando la librería "vegan" para los cálculos de diversidad [28-29]. Se realizó estadística descriptiva a partir de la cual se presentan gráficas de frecuencia de aparición de los diferentes géneros fúngicos con respecto a cada recinto, tipo y numero de muestras.

Declaración sobre aspectos éticos

Este estudio se clasifica como un estudio de riesgo mínimo y se condujo siguiendo las normas éticas aplicables a trabajos de investigación.

Resultados y discusión

Los museos albergan materiales orgánicos susceptibles al crecimiento de hongos debido a factores ambientales, acumulación de polvo y limitaciones en ventilación, almacenamiento y control climático [7, 14]. En el Parque Museo Arqueológico de Tunja, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se estudió la diversidad de hongos microscópicos en dos recintos específicos (Laboratorio de Osteología y Área de Reserva) y en distintas zonas (aire, objetos, superficies generales y piso). Estos espacios carecen de ventilación adecuada y contienen piezas bioantropológicas cubiertas de tierra y polvo, factores que favorecen la proliferación de hongos, especialmente los filamentosos, que deterioran los materiales y representan riesgos para la salud.

Este trabajo permitió detectar la presencia de hongos en todos los ambientes muestreados, en distinta frecuencia y cantidad de colonias. Se aislaron e identificaron 20 géneros de hongos filamentosos y levaduras: 11 en el aire, 13 en las superficies, 9 en los restos bioantropológicos y 12 en los objetos de cerámica. Los géneros predominantes fueron *Penicillium*, *Cladosporium*, *Fusarium y Botrytis*.

En las muestras de aire se identificaron los géneros de *Acremonium, Alternaria, Bipolaris, Botrytis, Cladosporium, Chrysosporium, Fusarium, Paecilomyces, Penicillium, Trichoderma, Trichothecium*.

En superficies se identificaron los géneros de *Aspergillus, Alternaria, Bipolaris, Botrytis, Cladosporium, Fusarium, Glioclaudium, Mucor, Paecilomyces, Penicillium, Rhizopus, Trichothecium y Verticilium*.

En restos bioantropológicos se identificaron los géneros de *Alternaria, Aspergillus, Botrytis, Cladosporium, Epicoccum, Fusarium, Penicillium, Trichothecium y Verticilium*.

En los objetos de cerámica se encontraron los géneros de *Acremonium, Aspergillus, Botrytis, Candida, Cladosporium, Chrysosporium, Geotrichum, Fusarium, Mucor, Penicillium, Rhodotorula, Trichoderma*.

Los géneros *Penicillium, Cladosporium, Fusarium y Botrytis*, se identificaron tanto en aire, superficies, restos bioantropológicos y en vasijas de cerámica.

Resultados según recintos

Con el propósito de conocer cómo las condiciones de ventilación deficiente, acumulación de polvo, tipo de material almacenado, humedad y temperatura influyen en la diversidad y distribución de los hongos en cada tipo de ambiente en el museo [21], se calcularon los índices de Shannon y Simpson [18, 27] según el tipo de muestra y para cada recinto.

Los valores del índice de Shannon para ambos recintos, Laboratorio de Osteología y Área de Reserva son similares: 2,3 y 2,2 respectivamente. Estos resultados indican que ambos tienen una diversidad de géneros fúngicos relativamente alta y similar. La pequeña diferencia sugiere que en el Laboratorio de Osteología puede haber una mayor diversidad de géneros o una distribución más uniforme de ellos.

El índice de Simpson es de 0,86 y 0,82 para los recintos 1 y 2 respectivamente. Esto muestra que el Laboratorio de Osteología (recinto 1) tiene una menor dominancia de un solo género, es decir, una mayor equidad en la distribución de géneros. En el Área de Reserva (recinto 2) algunos géneros pueden ser más dominantes, lo que se traduce en una ligera menor diversidad efectiva. En general, los dos recintos presentan comunidades de hongos diversas y distribuidas de manera equitativa, sin que un género en particular sea altamente dominante.

Los índices de Shannon y Simpson [30] permitieron evaluar la diversidad y equidad de géneros fúngicos en cada área. El Laboratorio de Osteología (recinto 1), presentó un índice de Shannon de 2,3 y un índice de Simpson de 0,86, mientras que en el Área de Reserva (recinto 2), los índices fueron de 2,2 y 0,82. Estos resultados reflejan una diversidad fúngica elevada y una distribución de géneros ligeramente más equitativa en el Laboratorio de Osteología, lo cual sugiere condiciones ambientales favorables para el desarrollo de una comunidad de hongos diversa, aunque con ciertos géneros dominantes en el recinto 2.

Se cuantificaron hongos filamentosos en una concentración fúngica que osciló entre 1115 y 1345 UFC/m^3 de aire, para el recinto 1 y de 385 a 463 UFC/m^3 de aire, para el recinto 2. Por lo cual, las concentraciones fúngicas detectadas oscilaron entre 385 y 1345 UFC/m^3 de aire. El mayor número de hongos filamentosos se registró en el Laboratorio de Osteología. Las concentraciones fúngicas también difieren, con valores altos en el recinto 1 (1115-1345 UFC/m^3) en comparación con el recinto 2 (385-463 UFC/m^3), según la escala de Omeliansky [24], lo cual indica niveles de contaminación significativamente mayores en el Laboratorio de Osteología [31]. Las mayores concentraciones fúngicas observadas en este recinto podrían asociarse con una mayor carga de material orgánico, acumulación de polvo, mayor manipulación de piezas y menor ventilación, factores reconocidos como determinantes de la contaminación fúngica en museos [31].

En el aire de los recintos del Parque Museo las concentraciones fúngicas estuvieron entre 385 y 1345 UFC/m^3 de aire, superadas por 2,6×10^2 UFC/m^{-3}, reportadas por Guiamet et al. [21], quizás se deba a la manera de almacenamiento y a los materiales arqueológicos almacenados [31] (Figura 1).

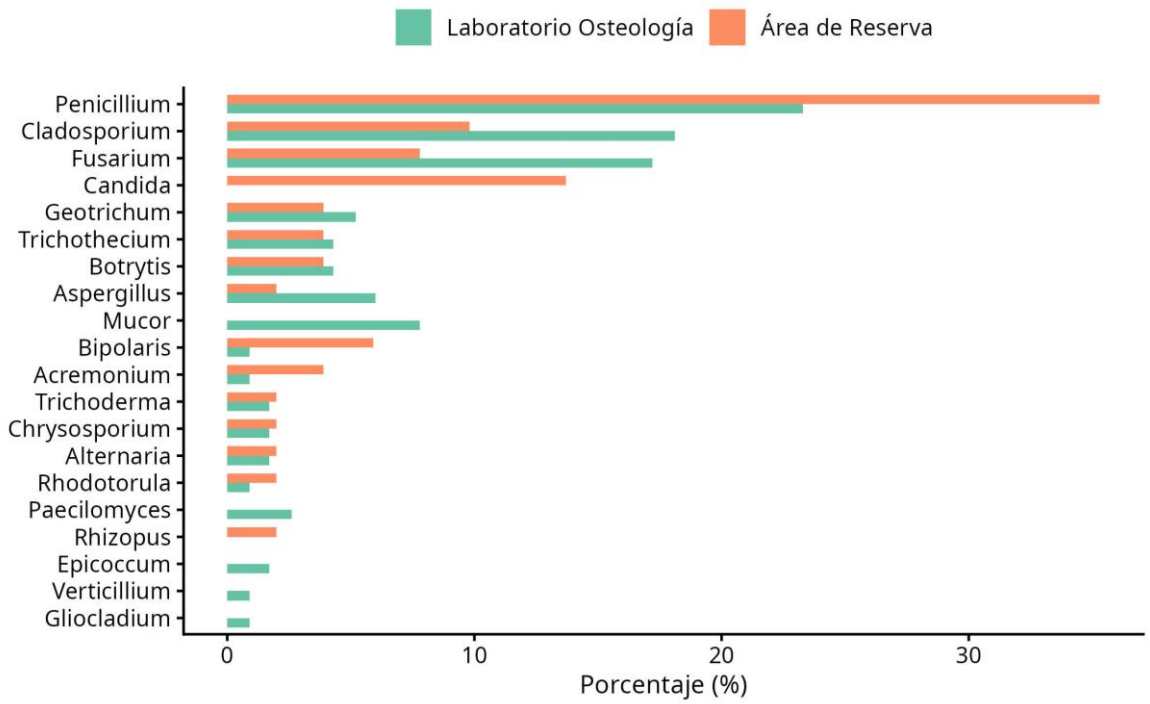


Figura 1. Distribución porcentual en cada recinto del museo y según el género de hongo.

Resultados según las zonas de muestreos (aire, objetos, superficies)

Índice de Shannon: el aire presenta la menor diversidad de hongos (Shannon 2,08) en comparación con los objetos (2,38) y las superficies (2,2), posiblemente debido a condiciones menos estables o con menor disponibilidad de nutrientes, favoreciendo la predominancia de ciertos géneros. En contraste, los objetos muestran la mayor diversidad y una distribución equitativa, probablemente debido a la variedad de materiales que ofrecen hábitats diferentes. Las superficies tienen una diversidad moderada, con condiciones favorables, aunque menos variadas que en los objetos [32-33].

El índice de Simpson es menor en el aire (0,84), lo que sugiere la dominancia de uno o pocos géneros y refleja menor equidad o estabilidad en esa zona. En cambio, los objetos (0,87) y las superficies (0,86) muestran una distribución de géneros más equitativa, sin un género dominante, indicando condiciones más favorables para una diversidad equilibrada en estas áreas.

En cuanto a las distintas zonas de muestreo, se encontraron diferencias en la diversidad fúngica. Los objetos presentaron la mayor diversidad y equidad de géneros, con un índice de Shannon de 2,38 y un índice de Simpson de 0,87, probablemente debido a la variedad de materiales que proporcionan hábitats favorables. Las superficies generales tienen una diversidad y equidad intermedias (índice de Shannon de 2,2 y Simpson de 0,86), indicando condiciones menos variadas en comparación con los objetos, pero que aún permiten el desarrollo de una comunidad fúngica equilibrada. El aire, con un índice de Shannon de 2,08 y de Simpson de 0,84, muestra una menor diversidad y una equidad más baja, sugiriendo condiciones inestables que favorecen la predominancia de pocos géneros. Finalmente, el piso presentó los valores más bajos (índice de Shannon de 1,88 y de Simpson de 0,8), indicando una fuerte dominancia de ciertos géneros en esta superficie, posiblemente debido a factores como la humedad y el tipo de material.

La Figura 2, muestra la distribución según frecuencia de los diferentes géneros de hongos que se encontraron a partir de muestras tomadas, en aire, superficies (pared y piso), y objetos de las colecciones del museo.

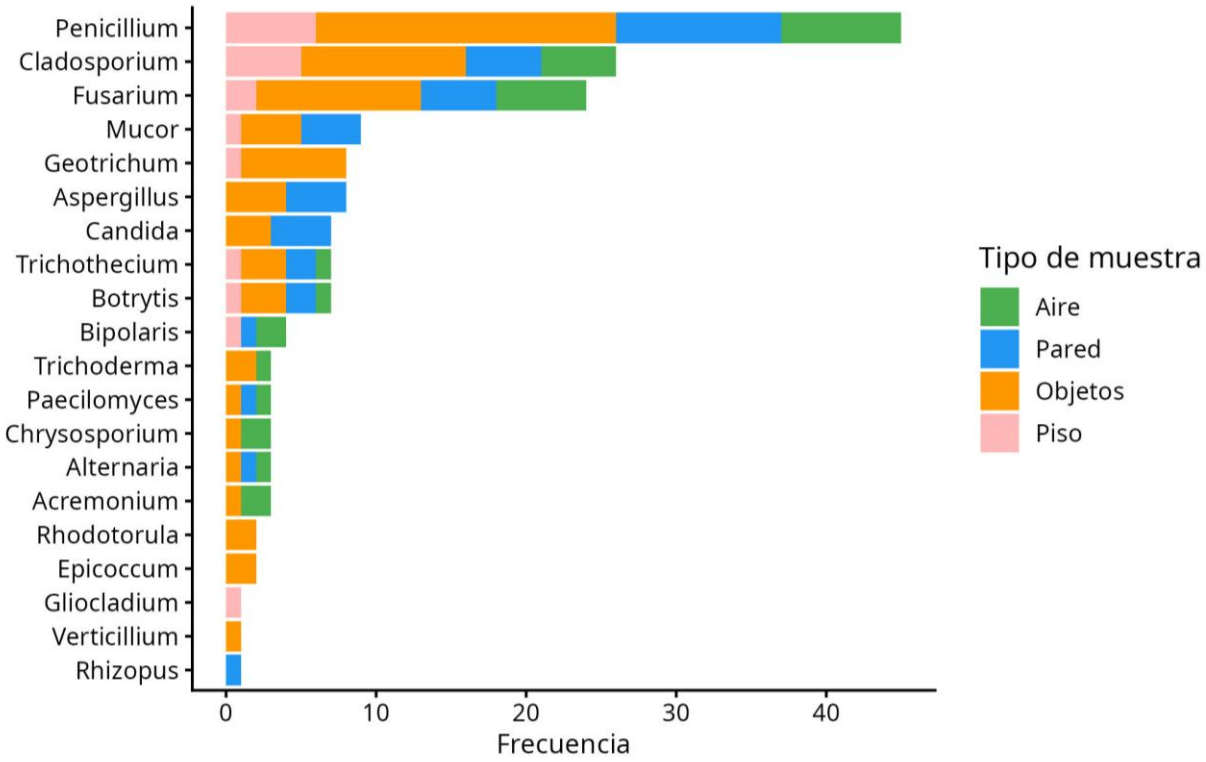


Figura 2. Distribución según frecuencia de cada género de hongo en cada sitio de muestreo.

Resultados según frecuencia, proporción y potencial patológico y/o de biodeterioro

Durante el estudio, se identificaron 20 géneros de hongos filamentosos y levaduras, siendo los más frecuentes *Penicillium*, con un 26,9 % de las muestras, le sigue *Cladosporium* con un 15,6 %, *Fusarium* con un 14,4 %, *Mucor* con un 5,4 %, y *Aspergillus* con un 4,8 %. Entre los que *Penicillium*, *Cladosporium* y *Aspergillus*, han sido reportados en ambientes y material arqueológico por varios estudios a nivel mundial [19, 21, 24, 31, 34].

La Figura 3, presenta el análisis integrado de frecuencia y potencial patogénico. Se evidencia que los géneros más prevalentes no corresponden exclusivamente a aquellos de mayor riesgo clínico, sino que existe una distribución heterogénea entre microorganismos de bajo, medio y alto potencial patogénico. Este hallazgo sugiere que el riesgo sanitario en el museo no depende únicamente de la abundancia, sino también de la composición específica de la comunidad fúngica, lo cual es consistente con reportes previos en ambientes interiores con carga biológica diversa. Gran parte de los hongos filamentosos y levaduras encontrados en el presente estudio, también fueron encontrados en estudios realizados en museos [21, 24, 34].

En la presente investigación se identificaron las levaduras *Candida*, *Rhodotorula* y *Geotrichum*; similar al estudio de, López-Aranda y Colaboradores, donde reportaron los géneros *Candida* y *Rhodotorula*, junto a hongos filamentosos, en momias, con visible deterioro [23].

La Figura 4, presenta la visualización conjunta de la frecuencia y el potencial de biodeterioro. Una proporción importante de los géneros identificados tiene capacidad para degradar tanto materiales orgánicos como inorgánicos. Estos géneros, comunes en museos a nivel global, están asociados tanto al deterioro de materiales, óseos y cerámicos, como a efectos adversos sobre la salud humana, incluyendo reacciones alérgicas y enfermedades respiratorias especialmente en personas inmunocomprometidas [35]. *Penicillium*, fue el género predominante en este estudio, representando un 29,6 % de los casos. Este género, frecuente en ambientes interiores [27, 31], posee enzimas que descomponen materiales inorgánicos, permitiéndole obtener nutrientes de objetos bioantropológicos, como lo observado especialmente en el Laboratorio de Osteología.

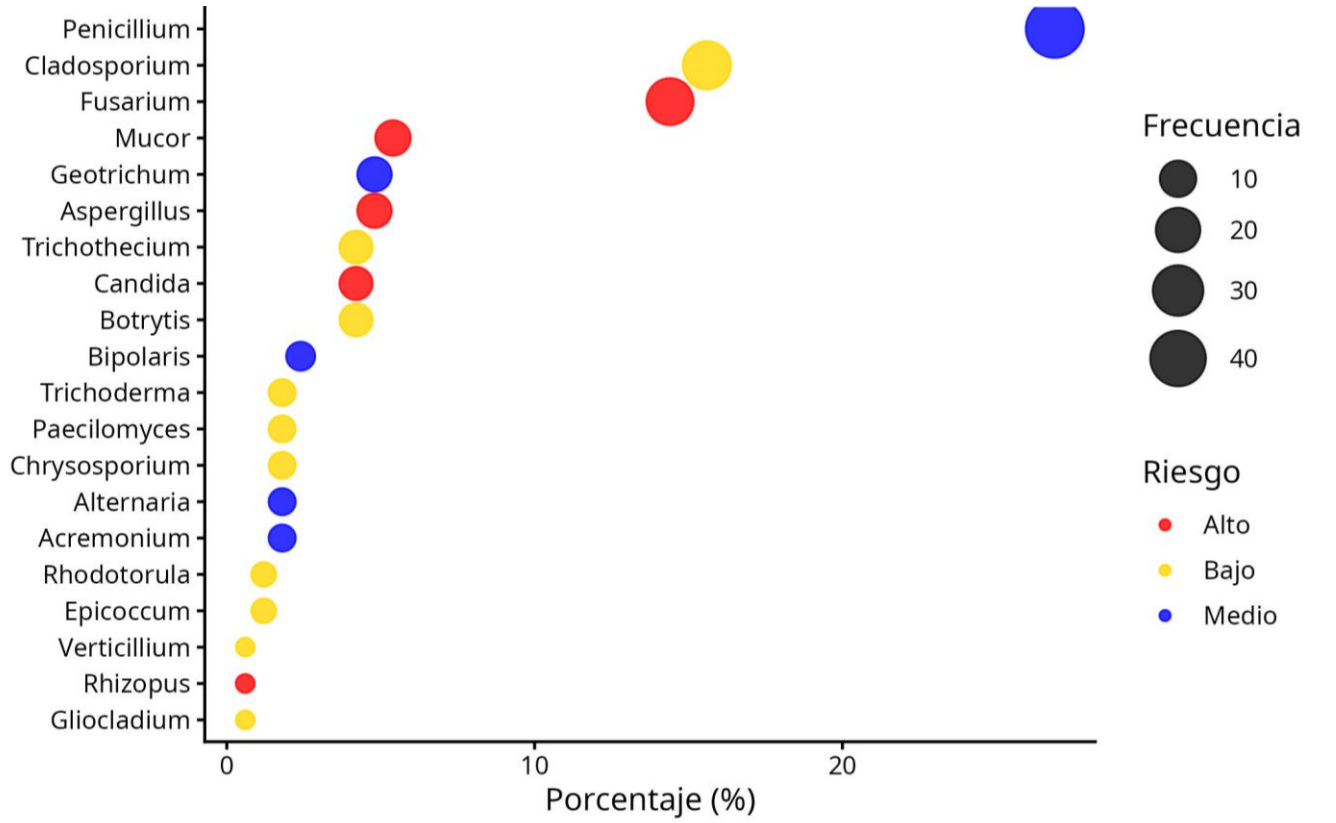


Figura 3. Distribución de los géneros fúngicos identificados según su frecuencia y proporción relativa, en relación con su potencial patogénico para humanos. El tamaño de las burbujas representa la frecuencia absoluta, mientras que la posición en el eje horizontal indica el porcentaje de ocurrencia. El color corresponde al nivel de riesgo patogénico clasificado en bajo, medio y alto, con base en reportes de la literatura científica.

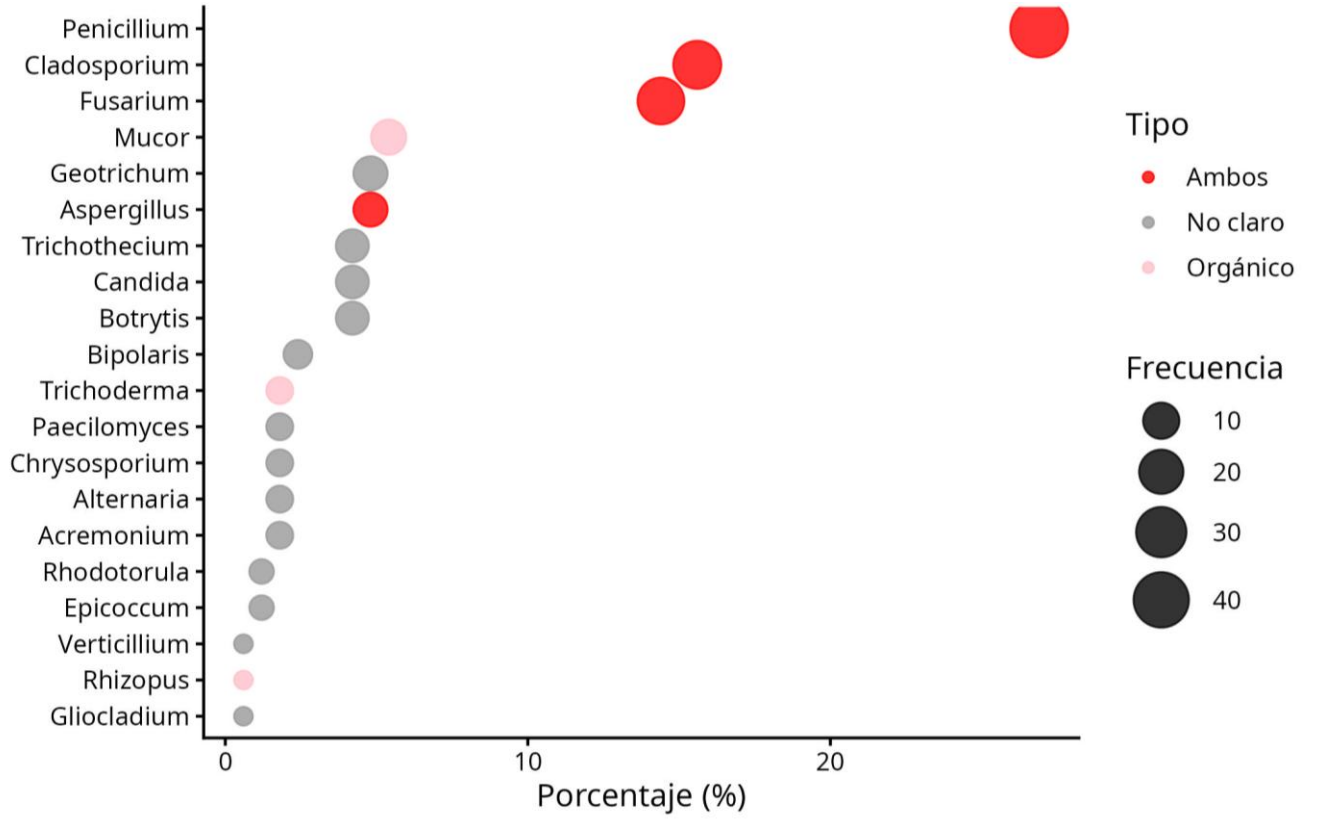


Figura 4. Distribución de los géneros fúngicos según su frecuencia y proporción relativa, en función de su potencial de biodeterioro sobre materiales patrimoniales. El tamaño de las burbujas representa la frecuencia absoluta de cada género, mientras que el eje horizontal indica su porcentaje de ocurrencia. Los colores corresponden a categorías de impacto sobre materiales orgánicos, inorgánicos o ambos, de acuerdo con su capacidad reportada en la literatura.

Las esporas del género *Penicillium* son reconocidas como contaminantes relevantes del patrimonio cultural, tal como se observó en el Museo objeto de este estudio. Su proliferación se ve favorecida no solo por factores ambientales, sino por su capacidad de reducir fosfato inorgánico, un componente de la hidroxiapatita presente en los huesos. Esto convierte a los restos óseos en una fuente casi inagotable de minerales para este género. Algunas especies de *Penicillium* son patógenas y pueden causar alergias, asma y alveolitis alérgica, e incluso se encuentran asociadas a infecciones invasoras en pacientes inmunocomprometidos [19, 34].

La presencia de *Aspergillus* y *Cladosporium*, refuerza la necesidad de implementar medidas de control en los espacios analizados para minimizar los riesgos de exposición prolongada, especialmente en personas vulnerables como niños, adultos mayores y aquellos con enfermedades crónicas. Los hongos del género *Aspergillus,* pueden causar infecciones pulmonares, sinusitis y, en algunos casos, están relacionados con enfermedades como bronconeumonía alérgica, aspergilosis, queratitis y sinusitis alérgica [34-35].

Por su parte, *Cladosporium* es uno de los géneros más comunes en ambientes interiores en suspensión en el aire, considerado un hongo dominante universal [21, 24, 31]. Está asociado con asma y esporosis, y algunas de sus especies son oportunistas, capaces de provocar procesos micóticos pulmonares, infecciones cutáneas, cromoblastomicosis y lesiones neurotrópicas [19, 34].

Fusarium, es un hongo oportunista encontrado principalmente en desechos y suelo, desempeña un papel importante en la degradación de detritos vegetales y como patógeno de plantas. Sin embargo, también puede causar infecciones en humanos y animales [35]. *Mucor,* un hongo saprofito que se alimenta de materia orgánica en descomposición causa mucormicosis, se identificó en un 5,4 % de los casos, mientras que en el estudio de Rodríguez-García fue raramente encontrado, por lo cual se consideró de poca importancia ecológica para el biodeterioro material [31, 35].

Geotrichum y *Acremonium,* pueden causar infecciones en personas inmunosuprimidas o inmunocomprometidas. *Geotrichum*, hongo levaduriforme oportunista en pacientes inmunosuprimidos puede causar infecciones pulmonares, intestinales, cutáneas y fungemias [36-37].

Los géneros *Botritys, Trichothecium, Chrysosporium, Gliocladium, Trichoderma* y *Verticillium,* no se consideran, en condiciones normales, patógenos para el ser humano, ya que su relevancia principal se asocia a ambientes naturales, suelos y material vegetal en descomposición. No obstante, su presencia resulta ecológicamente significativa, pues participan activamente en los procesos de degradación orgánica y equilibrio microbiano. En este contexto, también se destaca la identificación de géneros menos frecuentes como *Alternaria, Paecilomyces, Epicoccum y Bipolaris,* los cuales cumplen un papel relevante en la dinámica ecológica del Parque Museo Arqueológico de Tunja [36-37].

En contraste, algunos hongos y levaduras identificados presentan un mayor interés clínico. Las especies del género *Candida,* son reconocidas por su capacidad de causar infecciones oportunistas, como la candidiasis en diferentes sitios del cuerpo humano, especialmente en individuos inmunocomprometidos. De igual forma, *Rhizopus* puede ocasionar mucormicosis tanto localizada como diseminada, siendo la sinusitis y la neumonía las manifestaciones más frecuentes, generalmente asociadas a enfermedades subyacentes y favorecidas por la inhalación de esporas o la implantación traumática. Finalmente, las levaduras del género *Rhodotorula* han sido descritas como patógenos oportunistas capaces de producir infecciones graves, incluyendo fungemias, meningitis, endocarditis, peritonitis y endoftalmitis principalmente en pacientes inmunosuprimidos [36-37].

Los géneros *Penicillium, Alternaria, Cladosporium*, y *Rhizopus,* aislados en el presente estudio, también fueron reportados en investigaciones previas, como la de Lopez-Aranda, en el museo Tumbas Reales de Sipán [23].

Paecilomyces, aunque menos común, es un hongo filamentoso saprófito que suele aparecer como contaminante en laboratorios y puede causar infección en humanos, siendo identificado también en este estudio [38].

Los hallazgos subrayan la importancia de implementar un protocolo de control de calidad del aire y un monitoreo continuo de factores como humedad y temperatura en el Parque Museo

Arqueológico de Tunja. Estas medidas son esenciales para limitar la proliferación de hongos y garantizar la conservación adecuada de las colecciones. Se recomienda capacitar al personal en la identificación de situaciones de riesgo y en prácticas de higiene y ventilación. Adicionalmente, estudios más amplios sobre la diversidad microbiana en otros espacios similares permitirán desarrollar estrategias de preservación que protejan tanto las colecciones como la salud de visitantes y trabajadores.

Conclusiones

Destacan la presencia y variedad significativa de géneros fúngicos en las distintas áreas de muestreo.

El uso de los índices de Shannon y Simpson permitió cuantificar tanto la diversidad como la equidad en la distribución de géneros, revelando que las zonas con mayores valores de diversidad y equidad (como los objetos) ofrecen un ambiente más favorable para una comunidad fúngica diversa, mientras que el aire y el piso presentan menor diversidad y mayor predominancia de ciertos géneros.

Estos resultados sugieren que los materiales y las condiciones ambientales particulares de cada zona, como los niveles de humedad, ventilación, y tipo de superficies, influyen en la composición de la comunidad fúngica.

Los géneros *Penicillium*, *Cladosporium* y *Fusarium* fueron predominantes y coinciden con estudios similares en museos alrededor del mundo, evidenciando una problemática común en estos espacios de preservación. Estos hongos representan riesgos tanto para la integridad de los materiales, como los restos bioantropológicos y objetos de cerámica, como para la salud de los visitantes y personal del museo, especialmente en personas con sistemas inmunológicos comprometidos, dado que algunos de estos géneros están asociados con patologías respiratorias y reacciones alérgicas.

Se subraya la importancia de implementar medidas preventivas en el museo, tales como el control de calidad del aire, la mejora en la ventilación y la reducción de factores como la humedad y el polvo en los recintos. Además, se recomienda capacitar al personal para identificar y mitigar posibles focos de contaminación y realizar estudios periódicos de control microbiológico que contribuyan a la preservación de las colecciones y la salud de los usuarios. La continuidad de este tipo de investigaciones permitirá optimizar las estrategias de conservación en espacios patrimoniales y generar ambientes más seguros y sostenibles.

REFERENCIAS

1. Pradilla, H.; Villate, G.; Ortiz, F., 'Arqueología del cercado grande de los santuarios', *Boletín del Museo del Oro* (1993) 21-147.
2. Argüello, P., *Tunja Prehispánica*, UPTC, Tunja (2023), https://doi.org/10.19053/9789586607940.
3. Mallo, A. C.; Elíades, L. A.; Nitiu, D. S.; Saparrat, M. C. N., 'Fungal monitoring of the indoor air of the Museo de La Plata Herbarium, Argentina', *Revista Iberoamericana de Micología* **34**(2) (2017) 99-105, https://doi.org/10.1016/j.riam.2016.05.003.
4. Kour, D.; Khan, S. S.; Gusain, M.; Bassi, A.; Kaur, T.; Kataria, A.;Kaur, S.; Kour, H., 'Airborne fungal communities: diversity, health impacts, and potential AI applications in aeromycology', *Aerobiology* **3**(4) (2025) 10, https://doi.org/10.3390/aerobiology3040010.
5. Fashola, M. O.; Ajilogba, C. F.; Aremu, B. R.; Babalola, O. O., 'Airborne fungi and mycotoxins', in *Aeromicrobiology*, Elsevier, London (2023) 147-175, https://doi.org/10.1016/C2021-0-01860-5.
6. Lu, Y.; Wang, X.; Almeida, L. C. S. D. S.; Pecoraro, L., 'Environmental factors affecting diversity, structure, and temporal variation of airborne fungal communities in a research and teaching building of Tianjin University, China', *Journal of Fungi* **8**(5) (2022) 431, https://doi.org/10.3390/jof8050431.
7. Sterflinger, K., 'Fungi: their role in deterioration of cultural heritage', *Fungal Biology Reviews* **24**(1-2) (2010) 47-55, https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.03.003.
8. Farro-Barbaran, R.; Ramos-Iturregui, W. M.; Iglesias-Osores, S.; Carreño-Farfán, C., 'Aislamiento e identificación de microorganismos ambientales del museo Tumbas Reales de Sipán', *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* **24**(2) (2021) 1-11.
9. Mircea, C.; Vulpoi, A.; Rusu, I.; Radu, C.; Pârvu, M.; Kelemen, B., 'Exploring post-excavation degradation potential of fungal communities associated with archaeological human remains', *Archaeometry* **61**(3) (2019) 750-763, https://doi.org/10.1111/arcm.12438.

10. Koestler, R. J., 'Biodeterioration in museum collections', in *Met Objectives*, ed. D. Schorsch & M. Manuels, The Sherman Fairchild Center for Objects Conservation, New York (2002), https://repository.si.edu/items/d1e759f7-627d-4421-8d5d-ac09ff2cf1c6 (acceso en 2026-05-22).
11. Carrillo Chavez, L. M.; Arias Bermúdez, N.; Nieto Venegas, M. J.; Pinto Sanchez, N. R.; Patiño, M. C., 'Study of biodeterioration and evaluation of proteolytic activity caused by microorganisms in specimens of a zoological collection in Colombia', *Conservar Património* **45** (2023) 7-20, https://doi.org/10.14568/cp24895.
12. Kakakhel, M. A.; Wu, F.; Gu, J.-D.; Feng, H.; Shah, K.; Wang, W., 'Controlling biodeterioration of cultural heritage objects with biocides: a review', *International Biodeterioration & Biodegradation* **143** (2019) 104721, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104721.
13. Urzì, C.; Leo, F. D., 'Biodeterioration of cultural heritage in Italy: state of art', in *European Research on Cultural Heritage. State of Art Studies*, vol. 2, ed. D. Milos, Academy of Sciences in The Czech Republic, Praga (2004) 465-471.
14. Pinheiro, A. C.; Sequeira, S. O.; Macedo, M. F., 'Fungi in archives, libraries, and museums: a review on paper conservation and human health', *Critical Reviews in Microbiology* **45**(5-6) (2019) 686-700, https://doi.org/10.1080/1040841X.2019.1690420.
15. Wiszniewska, M.; Walusiak-Skorupa, J.; Gutarowska, B.; Krakowiak, A.; Pałczyński, C., 'Is the risk of allergic hypersensitivity to fungi increased by indoor exposure to moulds?', *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* **22**(4) (2009) 343-354, https://doi.org/10.2478/v10001-009-0030-7.
16. Scarlat, I.; Haiducu, M.; Stepa, R., 'Air contamination with fungals in museum', *ACTA Universitatis Cibiniensis* **66**(1) (2015) 165-168, https://doi.org/10.1515/aucts-2015-0047.
17. Zielińska-Jankiewicz, K.; Kozajda, A.; Piotrowska, M.; Szadkowska-Stańczyk, I., 'Microbiological contamination with moulds in work environment in libraries and archive storage facilities', *Annals of agricultural and environmental medicine* **15**(1) (2008)71-78.
18. Trovão, J.; Portugal, A.; Soares, F.; Paiva, D. S.; Mesquita, N.; Coelho, C.; Pinheiro, A. C.; Catarino, L.; Gil, F.; Tiago, I., 'Fungal diversity and distribution across distinct biodeterioration phenomena in limestone walls of the old cathedral of Coimbra, UNESCO World Heritage Site', *International Biodeterioration & Biodegradation* **142** (2019) 91-102, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.008.
19. Cepeda, R.; Luque, L.; Ramirez, D.; Franco, P.; Fabra, M., 'Monitoreo de hongos ambientales en laboratorios y reservas patrimoniales bioarqueologicas', *Boletín Micológico* **34**(2) (2019) 33-49, https://doi.org/10.22370/bolmicol.2019.34.2.1909.
20. Micali, O.; Montacutelli, R.; Tarsitani, G., 'Pathogenic microorganisms and situations of risk to man', in *Cultural heritage and aerobiology: methods and measurement techniques for biodeterioration monitoring*, eds. P. Mandrioli, G. Caneva y C. Sabbioni, Springer, Dordrecht (2003) 31-43.
21. Guiamet, P.; Borrego, S.; Lavin, P.; Perdomo, I.; de Saravia, S. G., 'Biofouling and biodeterioration in materials stored at the Historical Archive of the Museum of La Plata, Argentine and at the National Archive of the Republic of Cuba', *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **85**(2) (2011) 229-234, https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.02.031.
22. Pérez, H.; Sánchez, V. L., 'Propuesta de diseño de monitoreo ambiental microbiológico para diagnóstico de niveles de contaminación en áreas de procesamiento aséptico', *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* **44**(3) (2010) 7-14.
23. López-Aranda. B. G., 'Caracterización microbiológica de los almacenes del museo Tumbas Reales de Sipán en Lambayeque, Perú', *La zaranda de ideas* **18**(2) (2020) 136-145.
24. Bogomolova, E.; Kirtsideli, I., 'Airborne fungi in four stations of the St. Petersburg Underground railway system', *International Biodeterioration & Biodegradation* **63**(2) (2009) 156-160, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.05.008.
25. Larone, D. H., *Medically important fungi: a guide to identification*, 2ª ed., American Society for Microbiology, Washington, D.C (1993)
26. de Hoog, G.; Guarro, J.; Gené, J.; Figueras, M. J., *Atlas of clinical fungi*, CABI Digital Library (2000), https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20013005530.
27. Carvalho, H. L. da S. P., *Biodeterioration in cultural assets: fungal contamination assessment in art objects and documents*, tesis doctoral, Departamento de Ciencias da Vida, Universidade de Coimbra, Coimbra (2018).
28. R Core Team, *R: A Language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna (2023), https://www.R-project.org/ (acceso en 2026-05-22).
29. Oksanen, J; Simpson, G. L.; Guillaume Blanchet, F.; Kindt, R.; Legendre, P.; Minchin, p. R.; O'Hara, R. B.; Solymos, P.; Stevens, M. H. H.; Szoecs, E.; Wagner, H.;. et al., 'Ordination methods, diversity analysis and other functions for community and vegetation ecologists', in *vegan: Community Ecology Package* (2004), https://CRAN.R-project.org/package=vegan (acceso en 2026-05-22).
30. Magurran, A. E., *Measuring Biological Diversity*, Blackwell Publishing, Oxford (2004).
31. García, J. C. R., 'Microbiología aplicada: una herramienta parala conservación del Patrimonio Cultural', *Conservar Património* **24** (2016) 23-36, https://doi.org/10.14568/cp2015007.
32. Toyoda, A.; Shibata, Y.; Matsuo, Y.; Terada, K.; Sugimoto, H.; Higashi, K.; Mori, H.; Ikeuchi, A.;Ito, M.; Kurokawa, K.; Katahira, S., 'Diversity and compositional differences of the airborne microbiome in a biophilic indoor environment', *Scientific Reports* **13**(1) (2023) 8179, https://doi.org/10.1038/s41598-023-34928-9.
33. Adams, R. I.; Miletto, M.; Taylor, J. W.; Bruns, T. D., 'The diversity and distribution of fungi on residential surfaces', *PLoS ONE* **8**(11) (2013) e78866, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078866.
34. Méndez-Puentes, C. A.; Camacho-Suárez, J. G.; Echeverry-Hernández, S., 'Identification of bacteria and fungi in the air of Neiva, Colombia', *Revista de Salud Pública* **17**(5) (2015) 728-737, https://doi.org/10.15446/rsap.v17n5.38468.
35. Zaragoza, O., *Los hongos microscópicos, ¿Amigos o enemigos?*, Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), Centro Nacional de Microbiología (CNM), Madrid (2018), https://repisalud.isciii.es/handle/20.500.12105/11824.
36. Arenas Guzmán, R., *Micología médica ilustrada*, 6ª ed., McGraw-Hill Interamericana, Ciudad de México (2019).
37. Bonifaz Trujillo, J. A., *Micología médica básica*, 6ª ed., McGraw Hill, Ciudad de México (2020).

38. Senthilkumar, M.; Anandham, R.; Krishnamoorthy, R., 'Paecilomyces', in *Beneficial microbes in agro-ecology*, eds. N. Amaresan, M. S. Kumar, K. Annapurna, K. Kumar & A. Sankaranarayanan, Elsevier, London (2020) 793-808, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00041-1.

RECIBIDO: 2024.12.20
REVISTO: 2026.4.30
ACEPTADO: 2026.5.5
ONLINE: 2026.6.3

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es