

DISCURSO DE TOMA DE POSESIÓN

LOS MICROORGANISMOS EN EL BIODETERIORO DE LAS OBRAS DE ARTE Microorganisms in the biodeterioration of works of art

Domingo Marquina Díaz*

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España

dommarq@ucm.es

RESUMEN

España, es un país que cuenta con un extenso número de lugares reconocidos como Patrimonio de la Humanidad. Los lugares que cuentan con este reconocimiento cuentan con sistemas de conservación y restauración preventiva especializados. Sin embargo, existen multitud de lugares como iglesias, conventos, monasterios o museos locales sin este reconocimiento que están sometidos a procesos de deterioro producidos por agentes medioambientales y microbianos y carecen de estos servicios de prevención y restauración. El deterioro de una obra de arte sigue un proceso secuencial que comienza con la acción distintos factores físicos (humedad, luz, temperatura o pH), que favorecen el desarrollo de las poblaciones microbianas generando biodeterioro. Este se origina por el crecimiento de los microorganismos o por la producción de sustancias (metabolitos, enzimas, etc.) propias de su metabolismo que pueden producir un daño visible o no. La acción de los microorganismos sobre las obras de patrimonio va a depender de numerosos factores, aunque los más importantes son la composición (orgánica o inorgánica) del bien cultural y del tiempo de exposición a esos factores ambientales adversos. En aquellas obras con una composición heterogénea, el biodeterioro se produce por el ataque diferencial de los microorganismos a todas o a alguna de sus partes. Aunque los microorganismos en general juegan un papel negativo en el deterioro de las obras de arte, en la actualidad, existen líneas de trabajo encaminadas a emplear a los microorganismos como agentes para la biorremediación, utilizándolos en la limpieza de materiales pétreos y pinturas al fresco o sobre lienzo, que por métodos físicos o químicos tradicionales resultan difíciles de realizar. Por lo tanto, la Microbiología debería ser considerada siempre como una disciplina de gran importancia en las acciones de restauración y conservación preventiva de nuestro patrimonio mediante la identificación de los agentes microbianos que generan el biodeterioro o su uso para la biorremediación de los bienes culturales.

PALABRAS CLAVE: Obra de arte, microorganismos, biodeterioro, biorremediación, factores bióticos.

ABSTRACT

Spain is a country that has a large number of places recognized as World Heritage Sites. Places that have this recognition have specialized conservation and preventive restoration systems. However, there are many places such as churches, convents, monasteries or local museums without this recognition that are subject to deterioration processes caused by environmental and microbial agents and lack these prevention and restoration services. The deterioration of a work of art follows a sequential process that begins with the action of different physical factors (humidity, light, temperature, or pH), which favor the development of microbial populations generating biodeterioration. This is caused by the growth of microorganisms or by the production of substances (metabolites, enzymes, etc.) typical of their metabolism that may or may not cause visible damage. The action of microorganisms on heritage works will depend on numerous factors, although the most important are the composition (organic or inorganic) of the cultural asset and the time of exposure to these adverse environmental factors. In those works with a heterogeneous composition, biodeterioration is produced by the differential attack of microorganisms on all or some of its parts. Although microorganisms in general play a negative role in the deterioration of works of art, currently, there are lines of work aimed at using microorganisms as agents for bioremediation, using them in the cleaning of stone materials and fresco paintings or on canvas, which are difficult to achieve using traditional physical or chemical methods. Therefore, Microbiology should always be considered as a discipline of great importance in restoration and preventive conservation actions of our heritage through the identification of the microbial agents that generate biodeterioration or their use for the bioremediation of cultural assets.

KEYWORDS: Work of art, microorganisms, biodeterioration, bioremediation, biotic factors.

* Catedrático de Microbiología en la Universidad Complutense de Madrid

Excelentísimo señor Presidente de la Real Academia de Doctores de España; si me lo permite, y antes de comenzar con mi conferencia me gustaría leer unas palabras:

Hoy para mí, es uno de los días más importantes en mi carrera académica, y un día de agradecimientos.

En primer lugar, quiero agradecer a la Real Academia de Doctores de España haberme acogido entre sus miembros, y en su nombre a su presidente el Excelentísimo Señor D. Antonio Bascones Martínez.

Accedo a esta insigne institución, como aprendiz, y no como maestro, dispuesto a aprender de todos y cada uno de los Académicos que componen las secciones de la misma.

Quiero agradecer también a mi madrina, la Profesora Mónica de la Fuente del Rey, y al Profesor D. José María Teijón Ribera haber confiado en mí y haberme propuesto para ocupar el puesto de Académico Correspondiente en la Sección de Ciencias Experimentales. A la Presidenta de la Sección la Profesora Dña. Rosario Lunar Hernández, y a todos los académicos de la Sección, que con su voto han permitido mi incorporación en la misma.

A finales de los años setenta del siglo pasado me encontraba realizando mis estudios de bachillerato. Una mañana de primavera, mis padres me pidieron que les acompañase al Museo del Prado junto con unos amigos alemanes para enseñarles a éstos las obras más importantes de la pinacoteca. Al llegar a Velázquez, me dirigí a la antigua sala donde se exponía el cuadro de las Meninas, y comencé a contar las características técnicas del cuadro, el estudio de la perspectiva, la composición y disposición de los personajes, el color de los ropajes, etc. Hay que recordar, que por aquél entonces, la luz que iluminaba el cuadro salía de un espejo lateral que intentaba simular la luz que Velázquez quiso que tuviera el cuadro en el antiguo Alcázar de Madrid. Estaba embelesado en las explicaciones y no me di cuenta de que un señor estaba sentado en un banco delante del cuadro y que escuchaba atentamente mis explicaciones. En un momento, comenté que Velázquez, como ningún otro pintor, era capaz de pintar el aire y dar vida a sus personajes. Entonces, el señor, dobló el periódico y se dirigió a mi padre preguntándole si podía hablar conmigo. El señor me preguntó si me gustaba el arte, a lo que contesté afirmativamente, y a continuación me dijo que si quería asistir a las conferencias que por aquél entonces se impartían los miércoles por la tarde en el Museo.

Allí empezó mi relación exotérica y esotérica con el Prado.

El señor, a continuación, me dijo que le acompañase a otra sala donde se exhibía otro cuadro, que para él era uno de los mejores allí expuestos y que también tenía vida propia. Era el Lavatorio del *Tintoretto*. Efectivamente, el cuadro, mediante un profundo estudio de la

perspectiva cobra vida propia. La escena se modifica y los personajes se mueven según la disposición del observador. Desde entonces, este cuadro ha sido uno de mis cuadros favoritos del museo.

La mañana terminaba y el señor se despidió de nosotros, no sin antes presentarse. No era otro que Federico Sopeña Ibáñez, musicólogo, Presidente de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Director del Museo del Prado y fundador de la Fundación de amigos del citado museo.

Todo lo que sé de música y de arte se lo debo en gran parte a él y a mis padres.

Otra de las personas que ha influido profundamente en mi vida, ha sido el Profesor Fernández Ruíz. Benjamín, fue Catedrático de Biología Celular en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Complutense de Madrid. Académico de Número de la Sección de Ciencias Experimentales de esta insigne institución. Padrino en mi nombramiento como Catedrático de la Universidad Complutense y como Caballero de Yuste, pero, sobre todo, amigo con mayúsculas. Nos dejó hace dos años y creó un inmenso vacío en todos los que le conocimos.

Aunque no era microbiólogo, me supo dar sabios consejos sobre la ciencia y sobre la vida.

En parte, el tema de la conferencia que hoy presento en esta toma de posesión como académico es fruto de las enseñanzas que estas, y otras personas que no menciono han hecho de mí lo que soy.

Gracias por acompañarme en esta singladura que es la vida.

Excelentísimo Señor Presidente de la Real Academia de Doctores de España. Excelentísimo Señor Secretario General. Excelentísimo y Magnífico Señor Rector de la Universidad Complutense de Madrid. Excelentísima Señora D^a Mónica de la Fuente del Rey. Excelentísimos señoras y señores Académicos. Autoridades académicas, señoras, señores, amigos.

Con su permiso, voy a presentar mi conferencia de ingreso como Académico Correspondiente de la Sección Quinta de Ciencias Experimentales que lleva por título: *“Los microorganismos en el biodeterioro de las obras de arte”*.

Europa, es la región del mundo que cuenta con más sitios Patrimonio de la Humanidad, con un total de 501 (Mena, 2023). Dentro de Europa, España está situado como cuarto país con mayor patrimonio precedido por orden de Italia, Alemania, y Francia con 50 (Fig. 1).

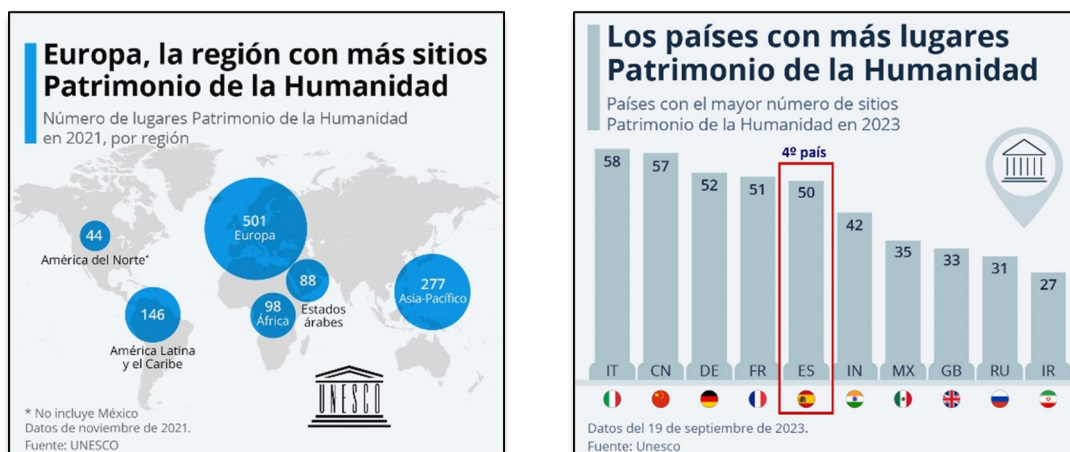


Fig. 1: Países del mundo con mayor Patrimonio Cultural, y España dentro de los mismos. Fuente: Unesco.

Precisamente, los lugares con este reconocimiento cuentan con sistemas de conservación y restauración preventiva especiales y las obras que se encuentran en su interior están en perfecto estado.

Sin embargo, existen una gran cantidad de lugares: ermitas, iglesias, monasterios y pequeños museos locales, donde las conservaciones de conservación no son las adecuadas, y el gran patrimonio que contienen está sujeto a sufrir deterioro.

Por ello, debemos ser conscientes que las obras de arte son bienes culturales que debemos preservar para futuras generaciones. Con independencia de su fecha de creación, son vulnerables a la degradación causada por factores ambientales (Herráez et al, 1999).

Ello implica, que los materiales que las componen (pintura, madera, piedra, metal, papel o textiles) son sensibles a las condiciones de su entorno.

La exposición a factores ambientales puede ocasionar su deterioro. Estos factores, pueden agruparse en dos tipos: los factores abióticos, como la exposición al aire (el oxígeno es un potente agente oxidante de los materiales que forman las obras artísticas), la luz (radiación ultravioleta), las variaciones de humedad, de temperatura y las oscilaciones del pH. Los factores bióticos los constituyen, los artrópodos (insectos) y los microorganismos (Allsopp, D; Seal, K.J, 1986).

Desde el punto de vista biológico, las obras de arte pueden ser consideradas como ecosistemas.

La definición de la RAE de ecosistema es: “La comunidad de seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente”.

Aplicando este concepto al estudio de las obras de arte, podríamos inferir que las obras artísticas son el sustrato (la materia que entra en los ciclos biogeoquímicos) (Caneva et al, 2000).

Cuando estas obras son expuestas a factores ambientales y a la acción de distintos agentes biológicos como son los microorganismos, los efectos que pueden producir son negativos, originando biodeterioro, o positivos, produciendo procesos de biorremediación.

Existe una gran diversidad de microorganismos responsables del biodeterioro de obras de arte, entre los que se encuentran distintos grupos de eubacterias, hongos filamentosos, algas unicelulares y líquenes (Fig. 2).



Fig.2. Diversidad de los microorganismos responsables del biodeterioro de las obras de arte (Marquina, 2024).

La secuencia del proceso de deterioro de una obra de arte comienza por la acción de factores físicos como la humedad, una escasa ventilación, el exceso de radiación lumínica, las variaciones de temperatura y la acción de ácidos y/o bases. Estas condiciones desfavorables permiten que, la obra de arte sea un sustrato sobre el que se desarrollen bacterias, hongos o microalgas, lo que permita que se favorezca el desarrollo secuencial de una serie de procesos que generen el biodeterioro microbiano, como la formación de biofilms, la secreción de enzimas por parte de los microorganismos del biofilm, como son las celulasas, amilasas proteasas etc. la generación de algunos metabolitos como son los ácidos orgánicos o las bases. El propio crecimiento microbiano, que genere la pérdida de cohesión de los materiales, mediante microfisuras o por compactación y la producción de pigmentos (Bellido, 2016).

Cada uno de estos tipos de alteraciones van a afectar de forma específica a los distintos componentes de las obras (Fig.3).

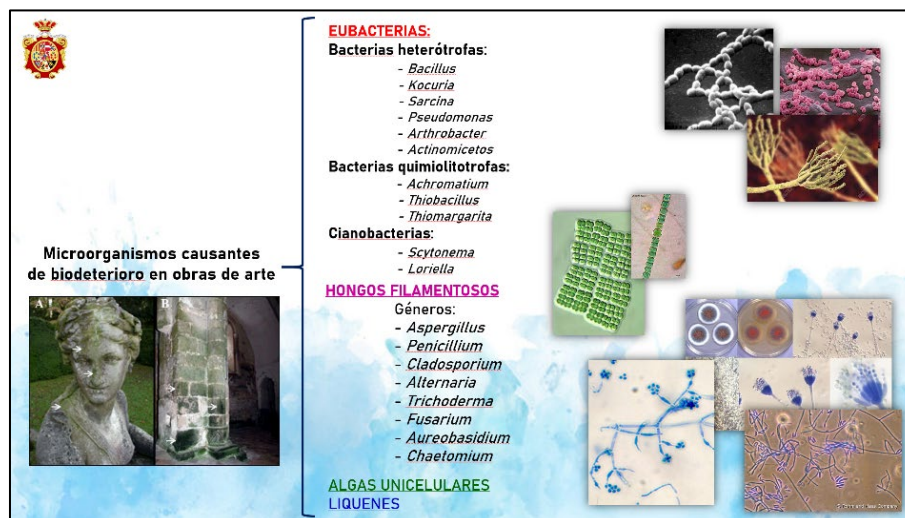


Fig. 3. Secuencia de procesos físicos/químicos y biológicos responsables del biodeterioro de una obra de arte (Santos, 2024).

De forma general, lo primero que se produce sobre una obra de arte, es el crecimiento de los microorganismos generando un biofilm, constituido por microorganismos que pueden producir polisacáridos y generar películas mucilaginosas

Los microorganismos, no actúan de forma individual, sino que forman consorcios microbianos, generando relaciones simbióticas, de tipo mutualista o antagonista, capaces de generar interacciones metabólicas entre ellos que van a ser las responsables de la producción de compuestos químicos responsables del biodeterioro, que pueden producir daño estético visible o no.

Los microorganismos producen enzimas, que son proteínas con actividad catalítica. Estas enzimas pueden ser intracelulares (sintetizadas por los microorganismos y no ser liberadas al medio), o extracelulares (producidas por los microorganismos y liberadas. Estas son las más peligrosas para las obras de arte. Las enzimas, utilizan las macromoléculas (proteínas, almidón, celulosa, gomas orgánicas, celulosa etc. y las transforman en compuestos más sencillos que son utilizados como nutrientes y permitir el crecimiento de los microorganismos, pudiendo generar distintos tipos de alteraciones.

La producción de ácidos orgánicos es otra característica de los microorganismos. Los microorganismos con respiración aerobia producen CO_2 y agua, que bajo ciertas condiciones pueden transformarse en ácido carbónico, que reacciona con los carbonatos cálcicos y magnésicos de los revocos o de las rocas calizas, produciendo su disolución debido a la formación de bicarbonato cálcico o magnésico solubles en agua.

Una consecuencia del crecimiento de los microorganismos es la fragmentación de los sustratos o soportes donde se encuentran. Los procesos de crecimiento en el interior de los mismos producen la fragmentación y la pérdida de cohesión de los mismos.

Muchos microorganismos producen pigmentos intra o extracelulares de diversa naturaleza (carotenoides, melaninas, flavinas, quininas, monascinas, violaceína etc.). Estos pigmentos pueden ser producidos por cualquier grupo microbiano, bacterias, levaduras, hongos filamentosos o microorganismos fotosintéticos...

Algunos ejemplos de estas alteraciones los podemos ver en medallones romanos presentes en la cartuja de Padua, y en las ruinas de Ankor Bat, donde se aprecia el crecimiento de bacterias, hongos filamentosos y microorganismos fotosintéticos.

Por todo lo anterior, podemos establecer que el biodeterioro de las obras de arte se va a producir en función del sustrato o soporte sobre el que estén realizadas (Schlegel, et al, 1981) pudiendo tratarse de soportes de naturaleza orgánica o inorgánica (Fig.4).



Fig.4. Clasificación de los soportes de las obras de arte en función de su naturaleza, orgánica o inorgánica.

Los soportes orgánicos como las materias vegetales, o animales o los materiales compuestos son muchos más susceptibles al deterioro que los inorgánicos como el material pétreo o los metales.

Las alteraciones producidas sobre materiales de origen vegetal se producen sobre la madera, el papel o los tejidos históricos.

La composición de estos materiales está constituida principalmente por polímeros como la celulosa la hemicelulosa el almidón o la lignina.

De todos los soportes vegetales, el papel es el más sensible al biodeterioro.

La fabricación del papel ha sufrido cambios notables a lo largo de la historia, pudiendo diferenciar los distintos tipos de papel elaborados antes del siglo XIX o posteriormente.

Los papeles anteriores a este periodo lo constituyen papeles elaborados con telas, papiro, papel de arroz, de mucha mejor calidad que los papeles actuales elaborados con madera, compuesta mayoritariamente de lignina y celulosa, junto con otras sustancias que facilitan su deterioro (Vaillant y Valentín, 1996).

El biodeterioro del papel, en el caso de los libros se produce mediante un ataque primario sobre la superficie del libro (Fig. 5), y posteriormente, las bacterias y hongos filamentosos responsables del mismo penetran al interior produciendo un ataque secundario, que puede llegar a generar la pérdida de la cohesión de las hojas (Pinzari y Gutarowska, 2021).

El papel es un material muy higroscópico. Una humedad relativa superior al 80 % hace que el papel sea capaz de retener entre un 9 a un 14% de agua, lo que facilita la colonización y el crecimiento de bacterias y hongos celulolíticos sobre su superficie (Fig.5B) (Pineda y Saldarriaga, 1992).

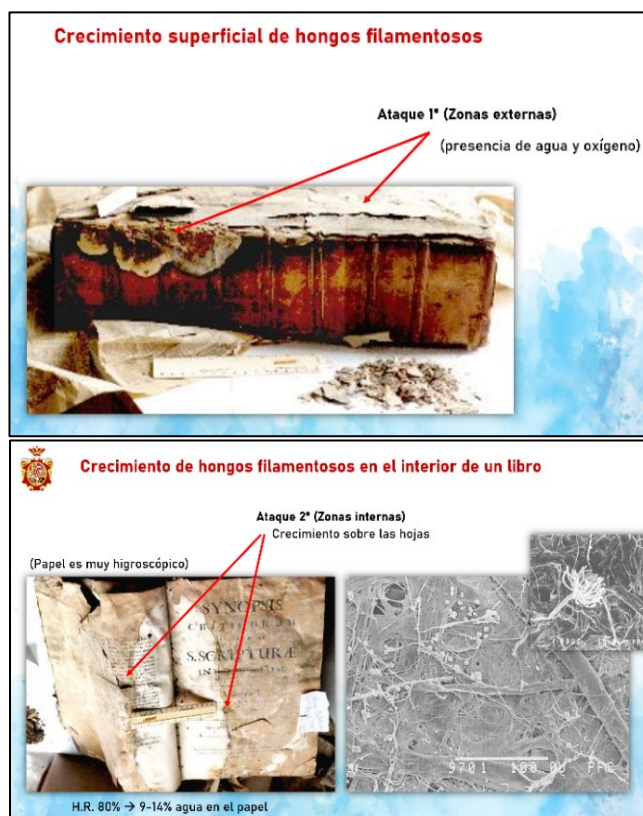


Fig.5. A) Ataque primario de hongos filamentosos sobre la superficie de un libro. B) Ataque secundario en el interior de las hojas de un libro por hongos filamentosos y su observación a través de microscopía electrónica de barrido.

Un efecto que produce el crecimiento de los hongos filamentosos sobre la superficie del papel es la aparición de manchas grises, que hay que diferenciar del *foxing*, que es un fenómeno químico producido por la oxidación de iones de hierro producidos por el enorme efecto oxidativo de la descomposición de los monómeros de la lignina.

También, la oxidación y acidificación de las tintas ferrogálicas producidas por el exceso de lignina que tiene el papel actual produce las llamadas tintas asesinas, que oscurecen el papel y pueden llegar a destruirlo completamente (Fig.6) (Vaillanta y Valentin, 1996).



Fig.6 Pardeamiento o foxing del papel y oxidación y acidificación de tintas ferrogálicas por acción de distintas especies de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* que producen las llamadas "tintas asesinas".

Los libros expuestos durante mucho tiempo a condiciones elevadas de humedad o incluso a inundaciones pueden favorecer la adherencia de las hojas de papel por crecimiento de las bacterias y de los hongos filamentosos generando la compactación de los libros.

Muchas obras de arte tienen como soporte materias animales como el pergamino, la lana o la seda, cuya composición mayoritaria es de proteínas como las queratinas, el colágeno o la albúmina. Productos altamente deteriorables por la acción de agentes ambientales o microbianos. El pergamino es un material producido a partir de la piel de las ovejas, cabras o embriones de cordero o ternera. Los tratamientos para su fabricación implican una maceración con cal para la eliminación de los pelos o de la lana superficial, un proceso de raspado, seguido del estirado, secado y pulido de la superficie. Como el pergamino está compuesto mayoritariamente por colágeno, elastina, albúmina y globulinas, los procesos de disgregación mecánica, las variaciones de la temperatura y la humedad o los valores extremos de pH debido a la incorporación de tintas u otros agentes, así como la exposición a la luz producen la hidrólisis de estas proteínas, de forma que pueden ser atacadas por bacterias y hongos filamentosos produciendo su biodeterioro que se manifiesta con un

aumento de su dureza, el acartonamiento, la fragilidad, deformaciones, cambios en el color o la disolución de las tintas (Paiva de Carvalho, 2016).

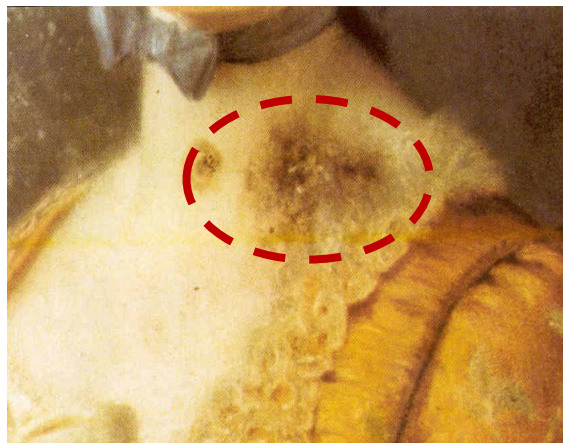


Fig. 7. Imagen del biodeterioro de una pintura realizada sobre pergamino, donde se aprecia el crecimiento de hongos filamentosos y los cambios de color sobre la pintura.

Pero, quizás, el biodeterioro de los materiales compuestos (pinturas de caballete) son las más conocidas. El deterioro de una pintura de caballete puede producirse en cualquiera de los materiales que la componen: bastidor, soporte, preparatoria, capa pictórica o barniz (Fig.8).

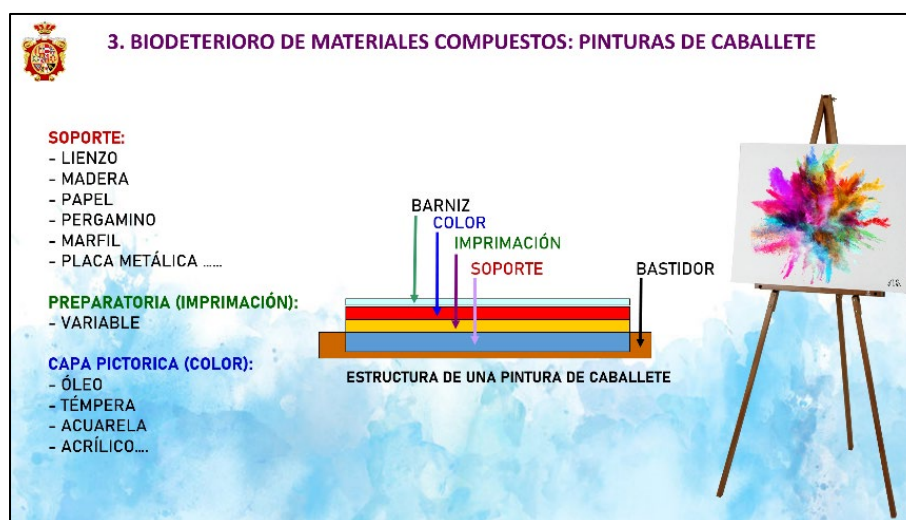


Fig.8. Partes que pueden constituir las pinturas de caballete (materiales compuestos) susceptibles de sufrir biodeterioro.

El ataque a los cuadros se produce cuando las condiciones ambientales son muy favorables: escasa ventilación, mucha humedad, calor y mucha iluminación, propias de edificios muy antiguos, pequeñas iglesias y museos sin acondicionamiento.

En muchos casos, y con toda la buena intención, pero con un gran desconocimiento, en algunos lugares se protegen las pinturas con un cristal para evitar el deterioro mecánico y así evitar su alteración, sin tener en cuenta que condiciones ambientales como la humedad

o una temperatura baja pueden producir la condensación de agua sobre el cristal, donde se favorece el crecimiento de los microorganismos biodeteriorantes.

El biodeterioro de los cuadros se origina generalmente en su parte posterior, donde se produce una mayor condensación de agua. Allí, el lienzo sin pintar es mucho más fácil de deteriorar que el pintado, también la presencia de colas vegetales y animales que empapan el lienzo facilitan su ataque, junto con el microclima húmedo sin ventilación creado entre el lienzo y la pared una cámara de incubación para el desarrollo de los microorganismos. Así pues, los soportes, de forma general son mucho más susceptibles a ser degradados que la capa pictórica (Fig.9) (Poyatos-Jiménez, 2021).



Fig.9. Efecto del biodeterioro producido por microorganismos en el anverso y reverso de una pintura al óleo sobre lienzo. En los esquemas laterales se aprecia la forma en la que los microorganismos invaden la obra.

Los pigmentos que forman un cuadro son también susceptibles de sufrir biodeterioro. De forma general, aquellos pigmentos constituidos por sales metálicas son menos susceptibles de ser biodeteriorados por microorganismos que los que tienen una base o están emulsionados con proteínas, como es el caso de las pinturas al temple o las témperas (Phulpoto et al, 2016).

Los pigmentos a base de sales de plomo, zinc, titanio o mercurio resultan prácticamente inalterables por la acción de los microorganismos, así como los barnices por su composición química y su carácter hidrofóbico.

En el año 2008, colaboramos con el equipo de restauración del antiguo Departamento de pintura 1 de la Facultad de Bellas Artes de la UCM para ayudar en la restauración de una tabla del siglo XV de la Escuela Castellana de pintura. “El cristo con la cruz a cuestras”. La tabla se encontraba (en préstamo) depositada en una iglesia de la provincia de Cáceres.

La exploración inicial de la obra mostraba graves daños de tipo estructural (pérdida de trozos del soporte de madera), pérdida de color, presencia de machas debidas al crecimiento de microorganismos, y un ataque microbiano visible, tanto en el reverso como en el anverso. Nuestra contribución en el proceso de restauración consistió en determinar los posibles microorganismos causantes del biodeterioro y su eliminación.

Las muestras superficiales de capa pictórica analizadas por microscopía electrónica de barrido mostraron la presencia de bacterias y micelio fúngico, que había penetrado en todas las capas de la obra.

El análisis de microscopía óptica de fluorescencia mostraba la aparición de un biofilm bacteriano depositado sobre la capa pictórica, y encima del mismo otro de naturaleza fúngica.

Para determinar las distintas especies microbianas presentes, empleamos técnicas de aislamiento e identificación propias de la Microbiología clásica. Estas técnicas única y exclusivamente permiten identificar aquellos microorganismos que son capaces de ser cultivados en medios de cultivo de laboratorio, pero que suponen tan sólo el 10% de la microbiota presente en la naturaleza. La literatura científica indica, que existe una gran cantidad de especies de microorganismos (sobre todo, bacterias quimiolitotrofas) responsables del biodeterioro de la capa pictórica de numerosas obras, y que su acción se produce, de forma lenta pero constante a lo largo de los años, pero que no son cultivables.

Su identificación requiere el empleo de técnicas de biología molecular.

Así pues, y empleando los dos tipos de técnicas, se pudo tener el espectro completo de las especies microbianas presentes en la tabla y responsables de su biodeterioro (Fig.10) (Santos et al, 2009).



Fig.10. Análisis de microscopía electrónica de barrido y microscopía de fluorescencia de la superficie pictórica del Cristo con la cruz a cuestras donde se observan los biofilms bacterianos existentes. Identificación de las poblaciones de microorganismos cultivables y no cultivables empleando técnicas de microbiología clásica y molecular.

Los microorganismos, son capaces también de producir el biodeterioro de materiales inorgánicos como la piedra o los metales. Estos soportes son colonizados mayoritariamente

por microorganismos autótrofos (no utilizan para crecer una fuente de carbono orgánica), aunque algunos microorganismos heterótrofos también pueden estar presentes debido a la formación de biofilms a partir de los microorganismos preexistentes.

Las antiguas técnicas empleadas en la restauración de estos materiales, en muchos casos no son capaces de eliminar los biofilms preexistentes, el empleo de ceras, agentes consolidantes o los excrementos de los pájaros contribuye a acelerar el biodeterioro, junto con los factores ambientales que pueden favorecer el mismo. Los microorganismos en su acción deteriorante de los materiales pétreos, producen ácidos fuertes, como el ac. Nítrico, el sulfúrico, el nitroso o el sulfhídrico, que producen la solubilización de los minerales de las rocas, con la consiguiente pérdida de peso, la aparición de costras negras, la pulverización y la exfoliación de los materiales (Fig.11).

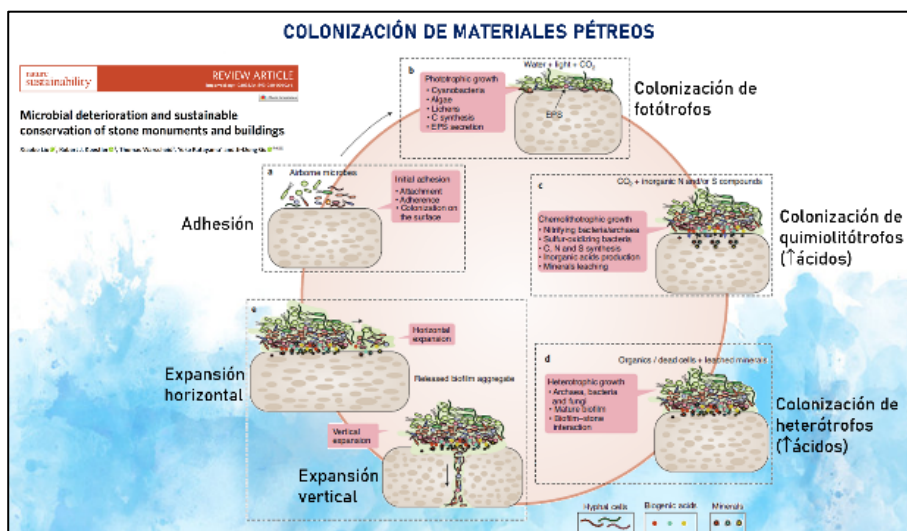


Fig.11. Colonización de las distintas poblaciones microbianas que producen el biodeterioro de las obras de arte fabricadas en piedra. Extraído de (Liu et al, 2020).

Un ejemplo muy indicativo de este ataque es el producido sobre la Columna Trajana. Situada al final de la avenida de los foros imperiales en Roma, en el Mercado de Trajano.

La columna trajana, es una obra del año 113 d. J.C. de 40 m de altura por 4 m de diámetro, que conmemora la victoria del emperador en la Dacia (Actual Rumanía). La columna sirvió para dar sepultura a las cenizas del emperador. A lo largo de la columna, de forma helicoidal en 18 bloques de mármol de Carrara, se detallan las victorias del emperador. Un análisis microscópico de los relieves del fuste de la columna, muestran un granulado (Scialbatura), que a microscopía electrónica de barrido se corresponde con precipitados de carbonatos y oxalatos debidos a la actividad de distintos grupos de microorganismos. También puede observarse la presencia de micro perforaciones o *Pitting*, como consecuencia de la disolución del mármol mediante la formación de bicarbonatos solubles en agua (Fig.12) (Coulston, 2002).

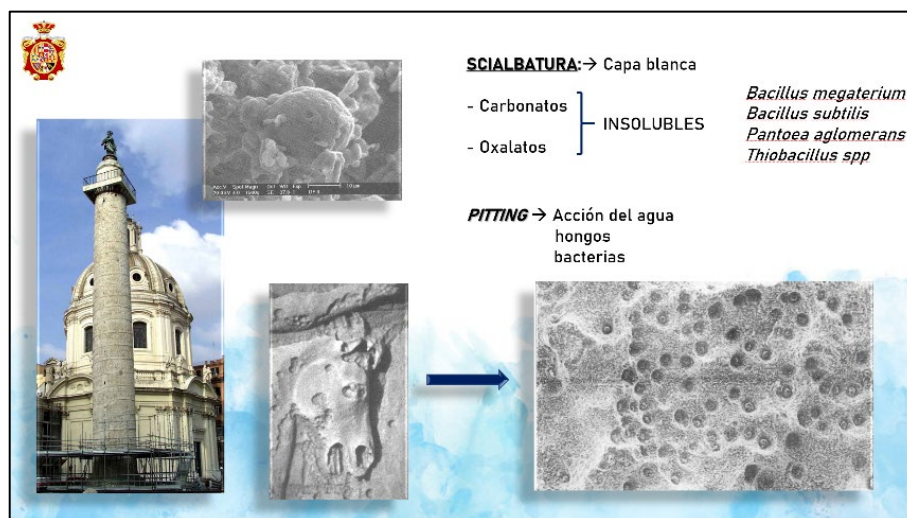


Fig.12. Fenómenos de biodeterioro producidos por acción de los microorganismos sobre el mármol de la Columna Trajana (Roma).

El efecto biodeteriorante de otros microorganismos sobre la piedra es la aparición de pigmentos, como es el caso del crecimiento observado de microorganismos del género *Kocuria* sobre medallones romanos de mármol en la fachada de la Cartuja de Padua.

Pero también las algas unicelulares y las cianobacterias pueden producir alteraciones sobre la piedra. Son capaces de absorber gran cantidad de agua, y mediante su metabolismo producir agentes ácidos que destruyan los componentes de las rocas. Los factores que condicionan su aparición son la luz, la humedad la temperatura y el pH de las rocas. Las rocas calcáreas son más susceptibles al deterioro que las graníticas.

Este daño estético es muy patente y puede observarse por ejemplo en la pirámide de Cayo Cestio en Roma, donde se observa toda la superficie cubierta por algas y bacterias cianofíceas. Después de la restauración realizada en 2015, se puede apreciar la mejora estética obtenida, eliminando los agentes biodeteriorantes e incorporando compuestos mineralizantes sobre la superficie.

Los metales son susceptibles de sufrir distintos tipos de corrosión, la corrosión seca, que se produce cuando el metal reacciona con una sustancia (oxígeno, el CO₂ o el ácido sulfhídrico), o la corrosión húmeda, cuando el metal se encuentra en ambientes húmedos (sumergidos en agua o saturados de humedad). En estas condiciones las bacterias quimiolitótrofas se suelen depositar sobre la superficie del metal creando una diferencia de potencial. La colonia microbiana se comporta como el ánodo de una pila eléctrica y comienza a desprender micropartículas de metal que se encuentran situadas debajo de ella, mientras que el cátodo es el resto del metal del que se liberaría hidrógeno y radicales OH⁻. En numerosas ocasiones la corrosión de los metales es una mezcla de corrosión seca y húmeda.

La estatua del hércules Mastai (se denomina así porque fue comprada por el cardenal Mastai, que fue el pontífice Pio IX) es un claro ejemplo de corrosión húmeda producida por microorganismos. Esta estatua de bronce dorado de 3,83 m de altura es la estatua de bronce más grande que queda de la época imperial. Fue descubierta en 1864 muy cerca de Campo di Fiore en Roma, en las ruinas del teatro de Pompeyo. Sobre esta escultura, en la antigüedad cayó un rayo, y por ello fue considerada como tocada por los dioses, y como tal fue enterrada, por ello ha podido llegar hasta nosotros (Fig.13).

La estatua se conserva hoy en día en el Octógono del museo Pio Clementino del Vaticano.

Puede observarse el nivel de corrosión en toda la figura, con numerosas pérdidas de material. En algunas zonas, la corrosión ha llegado hasta tal punto, que se ha producido la pérdida de partes completas. Su restauración comenzó en 2023, con un coste económico de 100.000€ (PAVM, 2024).

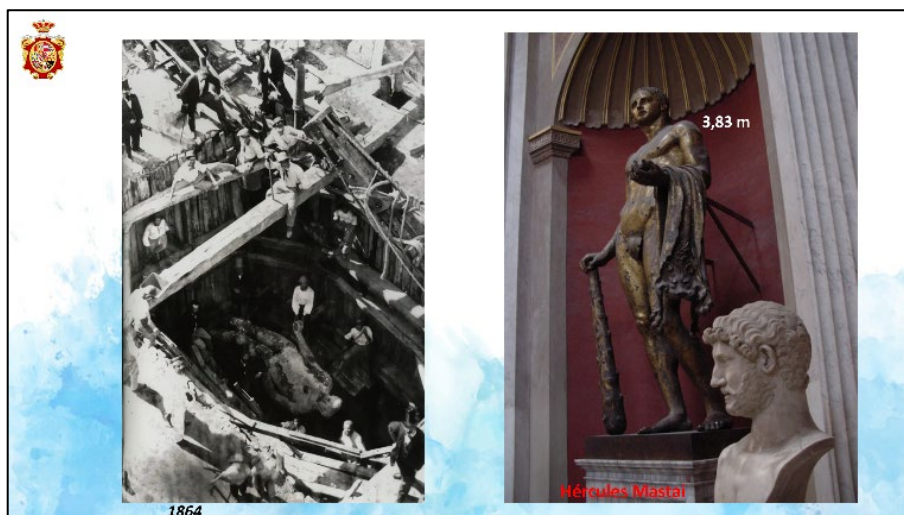


Fig.13. Efecto de la corrosión húmeda producida por la acción de microorganismos sobre el Hércules de Mastai (Museo Pio Clementino, Ciudad del Vaticano).

Hasta este momento, hemos podido ver la acción biodeteriorante de los microorganismos, pero los microorganismos también pueden ejercer un efecto beneficioso sobre las obras de arte mediante procesos de biorremediación.

Los microorganismos empleados en la biorremediación (biolimpieza), deben cumplir una serie de características, como no ser patógenos, no ser esporulados y que puedan destruirse fácilmente tras realizar su función.

Las ventajas de usar microorganismos en la biolimpieza abren nuevas puertas en la restauración, pues son capaces de eliminar sustancias complejas que empleando agentes químicos o enzimáticos no lo son. El empleo de microorganismos no es un método agresivo,

por lo que no suele afectar a los soportes. Se retiran fácilmente tras realizar su función, y sobre todo, son un método barato y ecológico.

Dos ejemplos claros del empleo de microorganismos en biolimpieza los tenemos con el caso de la bacteria *Pseudomonas stutzeri*, empleada por Pilar Bosch, una restauradora española en unos frescos en el Vaticano, y la utilización de distintas especies de la bacteria quimiolitotrofa del género *Desulfovibrio* utilizada para limpiar depósitos negros de rocas producidos por la sulfatación y la nitratación por acción atmosférica (Climent, 2014).

Por todo lo anteriormente expuesto, creo que deben tenerse en cuenta estas consideraciones a modo de conclusiones:

- 1.- España es uno de los países del mundo que cuenta con un mayor patrimonio cultural.
- 2.- Este patrimonio es de todos y debemos ser conscientes de poder transmitirlo a las siguientes generaciones en el mejor de los estados.
- 3.- Los fenómenos de deterioro de las obras de patrimonio histórico no solo se producen por la acción de los agentes ambientales, sino también por acción de los microorganismos.
- 4.- Los procesos de conservación de las obras de arte deben contar con un componente preventivo para evitar este biodeterioro por acción de los microorganismos.
- 5.- Es de vital importancia que los equipos de conservación del patrimonio artístico sean multidisciplinares y cuenten con microbiólogos con experiencia en biodeterioro.
- 6.- Si bien los microorganismos juegan un papel muy importante en el biodeterioro de las obras de arte, también empieza a conocerse su importancia en los procesos de biorremediación y conservación de las mismas.

En definitiva, la Microbiología es fundamental en la conservación del patrimonio cultural.

Muchas gracias.

REFERENCIAS

- MENA M. (2023). <https://es.statista.com/grafico/9132/espana-tercer-pais-con-mas-lugares-patrimonio-de-la-humanidad/> (Último acceso: 24-02-2024).
- HERRÁEZ, J.A. RODRÍGUEZ, M.A. (1999) La Conservación Preventiva de las Obras de Arte. En: "Conservación del Patrimonio Artístico". Pilar Sedano Espín (ed.). Arbor. Madrid. 164. núm. 645. 141-156.

- ALLSOPP, D., SEAL, K.J. (1986). Introduction to biodeterioration, Edward Arnold, London
- CANEVA, G., M.P. NUGARI Y O. SALVATORI. (2000). Factores ambientales en el biodeterioro. En: “La Biología en las obras de arte”. Ed. Nerea S.A. Sevilla.
- BELLIDO M.C. (2016). Agentes de deterioro medioambientales: planificar la conservación de las obras de arte. *Opción*, año 32, 11, 54-74.
- SCHLEGEL, H.G.; JANNASCH, H.W. (1981). “Prokaryotes and their habitats”. En: *The Prokaryotes*, M.P. Starr, H.G. Truper, A. Balows y H.G. Schlegel, Springer Verlag, 43-82.
- VAILLANT, M AND VALENTIN. N. (1996). Principios básicos de la conservación documental y causas de su deterioro. Ministerio de Educación y Cultura. Instituto de Patrimonio Histórico Español. Madrid.
- PINZARI F. AND B. GUTAROWSKA (2021). Extreme Colonizers and Rapid Profitreers: The challenging world of microorganisms that attack paper and parchment. Microorganisms in *Deterioration and Preservation of Cultural Heritage*. Edith Joseph ed. Springer. 79-113.
- PINEDA, F. Y SALDARRIAGA, Y. (1992) determinación de hongos y bacterias que deterioran los documentos de la Universidad de Antioquia. Tesis de grado. Universidad de Antioquia Medellín
- PAIVA DE CARVALHO, H., N. Mesquita, J. Trovão J. Peixoto da Silva, B. Rosa, R. Martins, A.M. L. Bandeira and A. Portugal (2016). Diversity of fungal species in ancient parchments collections of the archive of the University of Coimbra. *International Journal Biodeterioration and Biodegradation*. Elsevier. 106: 57-66
- POYATOS-JIMENEZ, F., F. MORALES, R. MORALES-CARRERA, SILVIA BOFFO, A. GIORDANO AND J. ROMERO-NOGUERA (2021) Fungal and Bacterial Biodeterioration of Outdoor Canvas Paintings: The Case of the Cloisters of Quito, Ecuador. *Critical Reviews TM in Eukaryotic Gene Expression*, 31(3):45–63.
- PHULPOTO, A.H., M. A. QAZI, S. MANGI, S. AHMED AND N. A. KANHAR (2016) Biodegradation of oil-based paint by Bacillus species monocultures isolated from the paint warehouses. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 13:125-134
- SANTOS, A., A. CERRADA, S. GARCÍA, M. SAN ANDRÉS, C. ABRUSCI, D. MARQUINA (2009) Application of molecular techniques to the elucidation of the microbial community structure of antique paintings. *Microbial Ecology*. 58:692-702.
- LIU, X., R. J. KOESTLER, T. WARSCHIED, Y. KATAYAMA AND JD GU, 2020. Microbial deterioration and sustainable conservation of stone monuments and buildings. *Nature Sustainability*, Nature, vol. 3: 991-1004.

- COULSTON, J. (2002) Description and Condition of Trajan's Column. In: <https://arts.st-andrews.ac.uk/trajans-column/the-project/description-and-condition-of-trajans-column/> (Último acceso: 24-02-2024).
- PAVM (2024). <https://www.patronsvaticanmuseums.org/en/restoration/projects/hercules-mastai> (Último acceso: 24-02-2024).
- CLIMENT, M. (2014). Limpiar el Vaticano con bacterias entrenadas para 'comer' suciedad. El Mundo online.
- <https://www.elmundo.es/economia/2014/02/13/52fd248c22601d6f448b4582.html> (Último acceso: 24-02-2024).