

La conservación preventiva de los bienes culturales

Paolo Mandrioli

Istituto di Scienze dell'Atmosfera del Clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Via Gobetti 102, I-40129. Bologna.

e-mail: p.mandrioli@isac.cnr.it

Resumen

La finalidad de la investigación aplicada a la conservación de los bienes culturales es valorar los riesgos de alteración de los materiales de interés histórico-artístico y arqueológico, provocados por organismos transportados a través del aire. Según el tipo de manufacturados y de las condiciones microclimáticas y de contaminación de los ambientes donde se conservan, las esporas y numerosos microorganismos aerotransportados pueden desarrollarse sobre diversas matrices y constituir un elemento de degradación. La valoración cualitativa y cuantitativa del bioaerosol, llevada a cabo mediante campañas de análisis específicos y teniendo en cuenta las características de los materiales y del ambiente, contribuyen a definir la situación de riesgo real de las obras de arte y proporcionan indicadores indispensables para realizar las oportunas intervenciones.

Palabras clave: aerobiología, conservación preventiva, deterioro biológico, patrimonio cultural.

Introducción

La relación entre disciplinas científicas y humanísticas, especialmente en sectores como la conservación del “Patrimonio cultural”, ha producido en las últimas cinco décadas una gran cantidad de bibliografía, sobre diversos aspectos relacionados con el diagnóstico de la alteración de los bienes culturales y con los problemas que se plantean a la hora de mejorar su conservación.

En muchas ocasiones se confunden los términos 'conservación' y 'restauración', pero al hablar de ambos, se hace referencia al concepto de integridad, entendido como “*conciencia del doble aspecto que caracteriza al bien cultural material*”, a saber, la materia que constituye un objeto y la información que transmite ese objeto (EN Normas europeas CEN/TC 346, 2020).

El significado atribuido a los términos 'conservación' y 'restauración' varía considerablemente en el área anglosajona y en el área latina. En la primera, el término más utilizado es el de 'conservación', que es el conjunto de acciones que se realizan sobre la propiedad y/o su entorno circundante, mientras que la 'restauración' es un momento opcional de conservación, que tiene como objetivo su mejora estética y no la transmisión temporal del hallazgo.

Forma de mencionar este artículo: Mandrioli, P. 2020, La conservación preventiva de los bienes culturales. *AmbioCiencias*, 18, 57-70. ISBN: 1998-3021 (edición digital), 2147-8942 (edición impresa). Depósito legal: LE-903-07.

En el área latina, el término 'restauración' es más utilizado porque está ligado a profundas raíces históricas aunque, como indica Brandi (1963) en su *Teoría del restauro*, la restauración se define como *el momento metodológico de reconocimiento de la obra de arte, en su consistencia física y su bipolaridad estética e histórica, de cara a ser transmitida al futuro*, introduciendo la noción moderna de conservación.

En la realidad, los términos conservación y restauración están, a veces, estrechamente relacionados y por esta razón ha aparecido recientemente el término 'conservación-restauración', útil para eliminar la ambigüedad y fácilmente traducible a muchos idiomas.

De hecho, el alcance de la conservación se diferencia en dos sectores:

- *conservación curativa*, cuyos medios actúan directamente sobre el hallazgo;
- *conservación preventiva*, que tiene como objetivo proteger el artefacto, no actuando directamente sobre él, sino interviniendo en el entorno circundante.

Por lo tanto, la conservación preventiva tiene como objetivo minimizar y, si es posible estabilizar, el avance del deterioro del patrimonio artístico y cultural, ya que dicho deterioro, como la vida misma, es un proceso imparable, espontáneo y continuo. La práctica de la conservación preventiva presenta una perspectiva amplia y racional y una noción compleja de conservación, que implica el control de factores ambientales físicos, químicos y biológicos como: luz, calor, temperatura, humedad, movimiento del aire, polvo, contaminantes gaseosos y componentes bióticos.

Para llevar a cabo dicha conservación, además del profundo conocimiento de los materiales que se han usado en los bienes artísticos más frecuentes (papel, telas, cuero, bronce, pinturas, etc.), se requiere de un estudio profundo del ambiente que les rodea o en el que se encuentran dichos objetos.

Así, los científicos que trabajan en el sector de la conservación deben tener un buen conocimiento de los procesos físico-químicos que regulan ambientes de interior y exterior, especialmente los factores implicados en la dispersión de partículas en la atmósfera así como su deposición, además de conocer nociones de botánica, entomología, microbiología y biología molecular.

Bioaerosoles y deterioro del patrimonio cultural

Los aerosoles de origen biológico (células, fracciones de células o materia orgánica de origen animal, vegetal o microbiano) constituyen una porción significativa de los aerosoles atmosféricos, alcanzando a veces casi el 50% de todo el

material particulado, o lo que viene a ser lo mismo, la parte biológica representa entre el 25% y el 40% en peso del material aerodisperso.

El bioaerosol es conocido también como “aerosol biológico primario” (PBAP). En el PBAP PM₁₀, las esporas de hongos forman el componente principal, pero también abundan los granos de polen, fragmentos de plantas y ciertas algas unicelulares. Durante el invierno (en las regiones templadas), la concentración de PBAP en la atmósfera es muy reducida, ya que la actividad metabólica de la vegetación no supera el 5%.

Por lo tanto, la aerobiología se puede aplicar a la conservación de los bienes culturales porque analiza el origen de las fuentes de producción de partículas y su dispersión, así como la deposición y los efectos que, el material vivo presente en el aire, puede ejercer en dichos bienes (Mandrioli, 2003).

Degradación por parámetros ambientales

Los parámetros ambientales que controlan el inicio de los procesos de biodeterioro son el agua, el calor, la luz y el sustrato. En ausencia de agua, bajo forma de vapor o líquida, las funciones vitales de los organismos se inhiben, incluso para cualquier valor de temperatura y para cualquier tipo de sustrato. El sustrato puede recibir agua por capilaridad, higroscopia o por condensación del vapor del ambiente. Un microorganismo crece y se reproduce, utilizando el agua que esté disponible en el sustrato en el cual vive. En el caso de los objetos, el agua disponible viene regulada exclusivamente por los ciclos de evaporación y condensación sobre su superficie, que condicionarán el éxito de la colonización por parte de microorganismos presentes.

Un parámetro, generalmente calculado, que permite conocer si sobre una superficie existe condensación o evaporación de agua, es la temperatura de rocío, cuyo valor depende de la temperatura y de la humedad relativa del aire. En la práctica, los microorganismos que están colonizando un sustrato, tendrán más disponibilidad de agua de la prevista según el cálculo de la temperatura de rocío, ya que la porosidad del sustrato puede modificar sensiblemente su capacidad de retención de agua. La presencia de microporos de dimensiones comprendidas entre 0,001 y 0,01 m permite una reserva de agua añadida, debido a la tensión superficial. La lucha contra la colonización microbiana, se puede conseguir disminuyendo los valores de humedad relativa del ambiente, pero sobre todo controlando la diferencia de homogeneidad térmica de las superficies (objetos, paredes, estructuras...). Por otra parte, una disminución excesiva de la humedad relativa del aire, puede provocar daños en algunos materiales, al modificar el volumen de las estructuras en cuestión.

Los diferentes mecanismos de deposición de las partículas biológicas afectan a su presencia sobre las superficies. Es decir, si las partículas tienen una dimensión comprendida entre 0,001 y 0,01 m, la eficiencia de la deposición es muy baja, mientras aumenta notablemente para aquellas con un intervalo de 0,1 a 10 m, ya que intervienen otros factores: el llamado *efecto Stefan* (transporte a través de procesos de evaporación-condensación), gravitacional (mayor densidad respecto al aire), electroforesis (carga eléctrica) y aerodinámicos (impacto). A través de los mismos, la deposición puede ocurrir en cualquier superficie, independientemente de la orientación (excepto la deposición gravitacional).

Deterioro biológico

El biodeterioro es descrito y analizado en términos dinámicos, igual que se analizan las comunidades de seres vivos, iniciándose con el reconocimiento de los organismos presentes y de sus modelos estructurales y funcionales, para llegar al muestreo y a la definición de las intervenciones que se deben efectuar. En definitiva, es imposible hablar de bienes culturales y biodeterioro sin mencionar el paisaje, entendido como la integración entre los componentes naturales y antrópicos.

El término 'biodeterioro' se debe a Hueck (1965), que lo definió por primera vez como “*cualquier cambio no deseado en las propiedades de un material, provocado por la actividad vital de organismos*”. El grado del cambio puede ser muy diverso, desde la disgregación y transformación irreversible del sustrato, hasta una presencia poco deseada de organismos, pero sin importantes consecuencias para el material (daño estético). Por 'biodeteriogenos' se entiende los microorganismos o los organismos que causan daño a los materiales.

En el ámbito de los bienes culturales se emplea el término de biodeterioro en lugar de biodegradación, ya que éste último por norma se refiere a los procesos biológicos mediante los cuales se produce la descomposición de macromoléculas orgánicas.

Para comprender los procesos de biodeterioro es necesario recordar que la colonización biológica de un material puede implicar:

- el uso del sustrato como fuente nutricional o
- el uso del material únicamente como soporte para el propio desarrollo.

Por lo tanto, para estudiar los procesos de biodeterioro hay que tener en cuenta la naturaleza química de los materiales, diferenciando entre materiales orgánicos e inorgánicos. En general, cuando se debe trabajar con fenómenos de degradación causados por el desarrollo de poblaciones biológicas, hay que tener

en consideración los daños objetivos, debidos a procesos físico-químicos unidos a su crecimiento. Hay que señalar también que una primera colonización biológica, aunque no cause muchos daños, no solo debe ser considerada como un daño estético, sino que puede favorecer el ataque de otras especies más agresivas.

Todos estos procesos llevan implícitas transformaciones como producción de ácidos inorgánicos y orgánicos, enzimas, pigmentos, etc. (Mandrioli, 1998). Entre los más relevantes cabe citar el complejo de las celulasas, enzimas hidrolíticas necesarias para la degradación de la celulosa, capaces de degradar el papel, la madera y derivados, así como tejidos de origen vegetal; o las enzimas proteolíticas capaces de atacar pergaminos y cueros; además de otras enzimas específicas que degradan los taninos de las tintas. Lo mismo ocurre con distintos tipos de ácidos liberados durante el metabolismo de ciertos microorganismos y organismos, que determinan alteraciones en numerosas obras de arte.

Resulta imprescindible el conocimiento sistemático y taxonómico de los distintos organismos vivos implicados en el biodeterioro. Este conocimiento sigue siendo limitado, especialmente en el caso de bacterias y hongos (**Fig. 1 A, B**), ya que es muy difícil la caracterización morfológica de muchas especies, así como su determinación precisa, que muchas veces sólo se puede realizar mediante técnicas bioquímicas y biomoleculares.



Figura 1. A) Pátinas marrones de cianobacterias; B) manchas rojas de *Trichoderma* sp. en un grabado

La monitorización ambiental

La monitorización ambiental es el instrumento primario que permite la caracterización cuantitativa del ambiente y del estado de las obras de arte bajo dos aspectos: a) análisis y control de las condiciones ambientales; b) control de las causas que provocan el deterioro de los materiales y de los objetos.

Como hemos dicho previamente, antes de la monitorización, es necesario el conocimiento de los principales procesos que regulan la interacción entre los materiales y el ambiente circundante (físico, químico y biológico). Por ello, la monitorización ambiental pone en evidencia, cuantitativamente e independientemente de la escala espacial, la constante relación que existe entre ambientes contiguos, como por ejemplo: el interior de una vitrina y la sala; la sala y el edificio; el edificio y el ambiente externo (Mandrioli, 2007).

El conocimiento y la elección de los instrumentos de medida son la condición imprescindible para realizar la monitorización y en consecuencia la conservación preventiva.

La medida de un parámetro específico se puede realizar con instrumentos diferentes, que se eligen según el tipo, la precisión, la complejidad y, por qué no, el costo. La tecnología actual está orientada a ofertar instrumentación que simplifique el uso y aumente la calidad de las medidas.

Las medidas ocasionales no permiten caracterizar un ambiente, sino solo las condiciones que existen en el momento de la toma de datos; por eso la monitorización se convierte en instrumento diagnóstico, sólo mediante la continuidad de los muestreos en el tiempo.

La monitorización y el análisis de la evolución de los parámetros ambientales también permiten la previsión de eventos a corto y medio plazo. Por ejemplo, en la **Figura 2**, se puede observar la tendencia de la temperatura de condensación del vapor atmosférico (temperatura de rocío) que se ha usado para predecir la activación o no de los sistemas de protección de los frescos o de las pinturas de una pared.

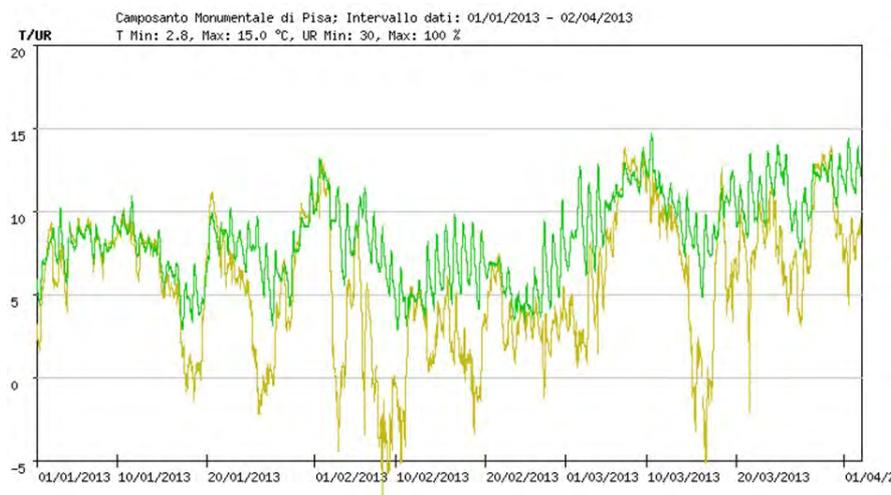


Figura 2. Temperatura de la superficie de un fresco (verde) y temperatura de rocío calculada (amarillo)

La continuidad de la monitorización es una condición necesaria para disponer de una base de datos suficientemente larga en el tiempo, que permita la correcta interpretación de la evolución de los parámetros medidos; por lo tanto, se debe evitar la interrupción de las medidas.

La elección de las estrategias de monitorización está centrada en las estructuras (desde tecas que contienen objetos valiosos, hasta edificios y grandes áreas), períodos de tiempo: de muestreo (aleatorio, estacional, anual o continuo), métodos (instrumentación manual, automático local o automático remoto). Actualmente, la flexibilidad de la instrumentación electrónica permite la modificación, sobre la marcha, de nuestro proyecto de monitorización, sin invalidar las medidas ya realizadas.

Para monitorizar los bienes culturales, se deben elegir los puntos claves o condiciones ambientales donde se ubican dichos bienes y para ello se usan redes, que reagrupan en una sola base de datos todas las medidas realizadas, que serán en número necesario y suficiente para caracterizar dicho ambiente (**Fig. 3**).

En definitiva, la monitorización del medio ambiente, sea microclimático, químico o biológico, permite la interacción directa o indirecta con los sistemas de control (calefacción, refrigeración, iluminación, etc.), diseñados para controlar los valores de los parámetros monitorizados. La experiencia demuestra que, si existe interés y colaboración, estos objetivos se pueden alcanzar sin dificultad.

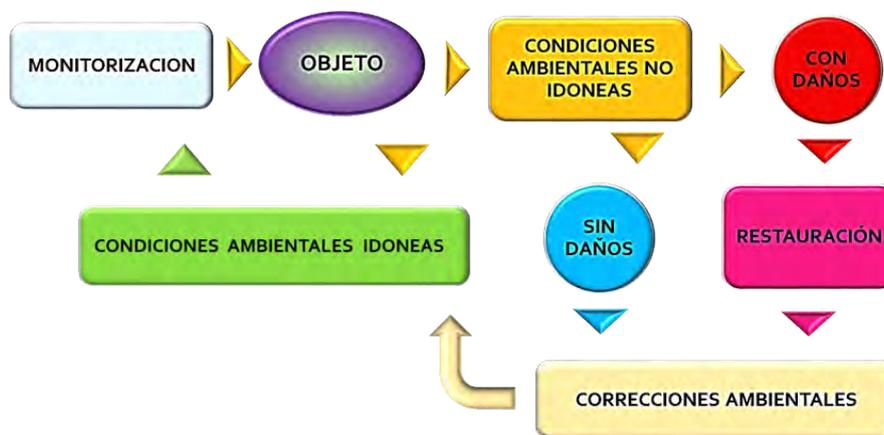


Figura 3. Modelo de conservación preventiva

Casos de estudio

Los frescos del Camposanto monumental de Pisa

La construcción del Camposanto, un claustro rectangular de 120 x 40 metros de estilo gótico floral, comenzó en 1278 y se completó en 1464. Los frescos del Camposanto se iniciaron en 1333 con la Crucifixión, de Francesco Traini y finalizaron con la Historia del Antiguo Testamento, de Benozzo Gozzoli pintada

más de un siglo después, en el 1484. El Laboratorio fotográfico Fratelli Alinari de Florencia, documentó los frescos de las cuatro galerías del Camposanto entre finales del '800 e inicio del '900, casi 2500 m² de frescos.

El 27 de julio de 1944, un fragmento de bomba de un ataque aéreo “aliado” provocó un incendio que, no pudiendo ser apagado a tiempo, destruyó el tejado del Camposanto cubierto de plomo, que colapsó y ocasionó grandes daños a todos los frescos de las paredes. En las imágenes (**Fig. 4 A, B**), el área en rojo identifica el mismo grupo de frescos que fueron dañados y restaurados 70 años después.



Figura 4. Camposanto monumental de Pisa: **A)** septiembre de 1944, foto de lado sur de la entrada; **B)** marzo de 2017: finalización de la restauración de los frescos e instalación en la pared original

En el año 2008 se presentó un "Proyecto de Restauración Integral", cuyas pautas se orientaron hacia los métodos de conservación que debían adoptarse, para reubicar en las paredes los frescos dañados durante el bombardeo. El proyecto requirió de un gran esfuerzo logístico y económico, para poder recuperar y reentelar los frescos sobre nuevos soportes (**Fig.5 A, B, C**), con la monitorización continua del microclima del Camposanto (**Fig. 6**) y con un sistema complejo para proteger los frescos de la condensación de vapor de agua y de la deposición de polvo fino.

Para limpiar la superficie de los frescos se utilizó una técnica microbiológica que emplea bacterias (*Pseudomonas stutzeri*) genéticamente modificadas, capaces de eliminar la caseína y la cola (gelatinas de peces), muy utilizadas en restauraciones anteriores, antiguas y recientes (Ranalli *et al.* 2018).



Figura 5. A) nuevo método de reentelado de los frescos; B) aplicación de la suspensión acuosa de *Pseudomonas stutzeri*; C) el resultado de la limpieza con bacterias es visible en el lado izquierdo de la superficie del “strappo”

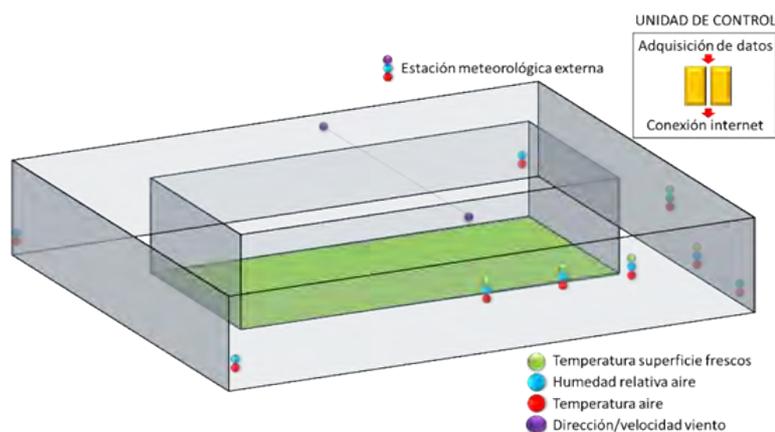


Figura 6. Camposanto, red de monitorización microclimática mediante wifi e intranet

La solución adoptada para defender los frescos de la condensación y del polvo, en apariencia simple, fue la de calentar el lado posterior del panel sobre el cual están fijados los mismos (Fig. 7).



Figura 7. A) El tejido calefactor calienta el soporte del fresco reentelado; B) Algoritmo anti-condensación

El tejido calefactor es un tejido especial compuesto de fibras de poliéster y fibras de carbono como resistencia eléctrica (Fig. 7A). La actuación del sistema de calefacción ocurre a través del procesamiento en tiempo real de los datos obtenidos mediante la red permanente de sensores *wireless* ambientales y un algoritmo anti-condensación (Fig. 7B). En el Camposanto se realizaron: a) la fija-

ción del panel a la estructura metálica, b) la instalación de sensores de temperatura de superficie, c) la elevación del panel para el anclaje a la pared. Cada escena se compone de numerosos “strappi” (**Fig. 8**).



Figura 8. Procedimiento para instalar piezas de una escena en la pared: **A)** 1 strappo reentelado, **2** tejido calefactor, **3** estructura metálica; **B)** anclaje a la pared; **C)** andamio móvil para finalizar la restauración

El control periódico para la eficiencia del calentamiento se realiza con medidas termográficas con una precisión de una décima de grado (**Fig. 9**).

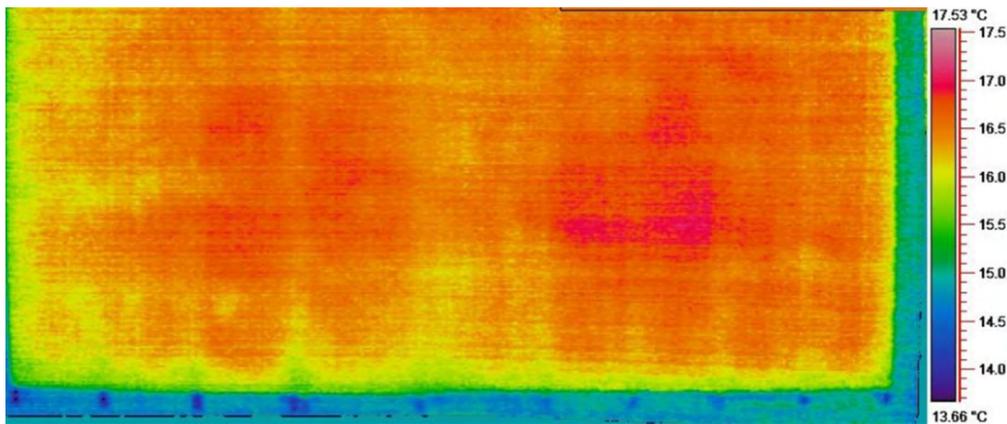


Figura 9. Termografía del cuarto de la parte inferior derecha de una escena. El borde azul corresponde a la estructura metálica perimetral. A la derecha, la escala de temperatura/colores.

El 6 de junio de 2018, una vez finalizada la restauración del “*Triunfo de la muerte*” (40 x 9 m²) de Buonamico Buffalmacco, el proyecto concluyó con el regreso de todos los frescos a las paredes del Camposanto (**Fig. 10**).



Figura 10. Reposición en la pared del último fresco restaurado

La Capilla Sixtina

La necesidad de crear una red de monitorización microclimática en la Capilla Sixtina surgió en el año 2010, durante una campaña llevada a cabo para desempolvar las pinturas murales (**Fig. 11 A**), en la cual se constató la existencia de un depósito visible de partículas en la superficie de las mismas, así como algunas incipientes “manchas blancas”.

Se planteó el problema de valorar si el sistema de climatización y recambio del aire, usado desde 1993, era todavía eficaz y capaz de garantizar las

condiciones idóneas para conservar las pinturas murales. De hecho, desde entonces el número de visitantes había aumentado enormemente, superando en el 2011 la cifra de los cinco millones anuales y, con frecuencia, los 20.000 diarios.

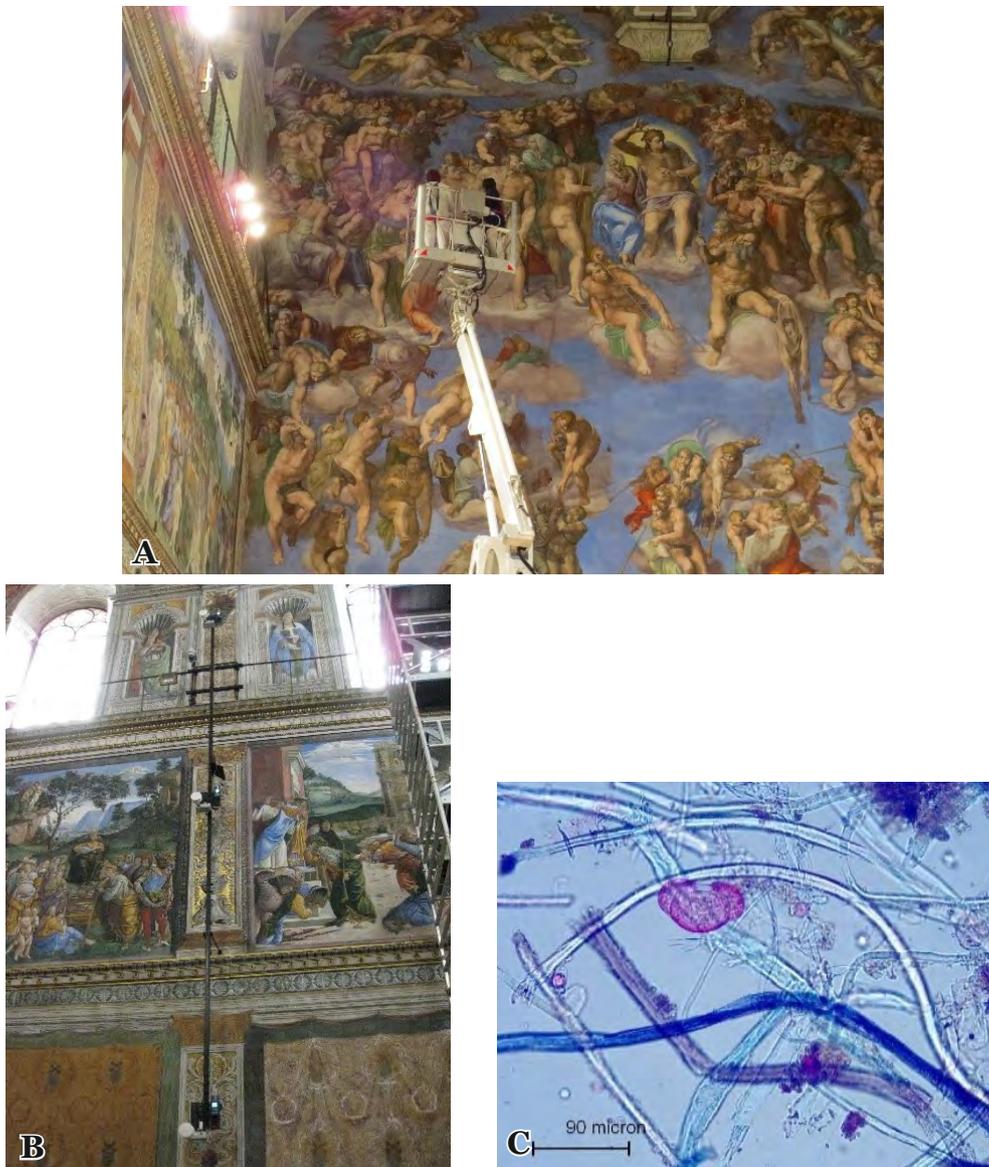


Figura 11. Capilla Sixtina. **A)** Operación para desempolvar los frescos; **B)** instalación temporal de sensores de temperatura, humedad relativa, polvo, dióxido de carbono; **C)** material particulado aerodisperso: polen, esporas, pelos vegetales y fibras sintéticas y naturales.

La exigencia de comprender cada aspecto de la calidad y del movimiento del aire llevó a la creación de un red de monitorización (**Fig. 11 B**) para controlar de forma continua los siguientes parámetros: temperatura del aire, humedad

relativa del aire, temperatura de la superficie en las paredes o punto de rocío, tipo de estratificación aérea del CO₂; análisis del polvo (**Fig. 11c**) presente a distintas alturas; y dirección y velocidad del flujo del aire de entrada y salida de la Capilla (Mandrioli, 2015), todo ello relacionándolo con la cantidad de personas presentes al mismo tiempo en el recinto. Es sabido que la presencia de público (**Fig. 12**) no sólo aporta un incremento de calor y de humedad, sino que también constituye un vehículo de ingreso de contaminantes sólidos o en forma de gas, además de la gran producción de CO₂, debida a la respiración humana.



Figura 12. Afluencia de visitantes en la Capilla Sixtina

El largo y complejo estudio, finalizado en 2020, ha permitido definir unas líneas guía y desarrollar propuestas técnicas adaptadas al entorno, que consistieron básicamente en la implantación de nuevos sistemas de iluminación y de intercambio de aire y en llevar a cabo campañas de limpieza del polvo y control de las superficies con cadencia bianual.

Bibliografía

- Brandi, C. 1963. *Teoria del restauro*, pp.164. Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, Italia
- Hueck H.J. 1965. The biodeterioration of materials as a part of Hylobiology. *Mater Organismen* 1: 5-34
- Mandrioli, P. 1998. Metodi di analisi della componente biologica dell'aria. En *Aerobiologia e Beni Culturali, metodologie e tecniche di misura*, cap. 6, 161-189. Editori P. Mandrioli e G. Caneva, Nardini Editore, Firenze



- Mandrioli, P. 2003. Methods and techniques of aerobiological survey. En *Cultural Heritage And Aerobiology: Methods and measurement techniques for Biodeterioration Monitoring*, chap. 6, 161-189. Editors: P. Mandrioli, G. Caneva and C. Sabbioni, Kluwer Academic Publishers
- Mandrioli, P. 2007. Capitoli 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. En *Oggetti nel tempo. Principi e tecniche di conservazione preventiva*. Istituto Beni Culturali, Collana ER musei e territorio. Materiali e ricerche n. 7, pp. 258; Editore CLUEB, Bologna
- Mandrioli, P. 2015. The importance of the environmental parameters for the conservation of mural paintings. The Sistine Chapel environment. En *The Sistine Chapel, twenty years later. New breath new light*. pp 119-133, Eds. Musei Vaticani, Città del Vaticano
- Ranalli, G., Zanardini, E., Andreotti, A., Colombini, M.P., Corti, C., Bosch-Roig, P., De Nuntiis, P., Lustrato, G., Mandrioli, P., Rampazzi, L., Giantomassi, C. y Zari, D. 2018. Hi-tech restoration by two-steps biocleaning process of Triumph of Death fresco at the Camposanto Monumental Cemetery (Pisa, Italy). *Journal of Applied Microbiology* 125: 800-812
- EN Normas europeas CEN/TC 346 - Conservation of Cultural Heritage. Disponible en: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:32:0::: FSP_ORG_ID:411453&cs=11079A55D70F8377E3942E1C6704C7664