

# *Propuesta de monitorización integral de la calidad ambiental del interior de la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia*

**Pilar Bosch-Roig**

Doctora y Profesora asociada del Departamento de Conservación y Restauración e investigadora del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de Valencia

pboschroig@gmail.com

**Julia Díaz Alonso**

Restauradora de la Universitat Politècnica de Valencia

judiaaloro2@gmail.com

**Enrique Vivó Soria**

Doctor Ingeniero. Colaborador e investigador del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de Valencia

vivoenrique@gmail.com

## RESUMEN

Para la correcta conservación de los bienes de interés cultural (BIC), debe existir una óptima calidad ambiental interior. La monitorización de esta calidad ambiental, tradicionalmente, incluye el estudio de la humedad y la temperatura de los espacios interiores ya que es bien conocido que sus valores elevados y fluctuaciones rápidas pueden alterar los materiales constitutivos de las obras de arte. Sin embargo, hay muchos otros parámetros que se deben estudiar para tener una visión completa de los riesgos potenciales relacionados con ambientes patrimoniales. En este trabajo, planteamos la importancia de una monitorización integral sistemática de la calidad ambiental de un bien patrimonial que debe incluir parámetros como: temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>, iluminación (UVA y UVB), materia particulada y bioaerosoles. Se muestran los resultados comparativos preliminares del estudio realizado en 2009 y diez años después (2019) en la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia que se enmarcan en los estudios previos para su próxima restauración.

**Palabras clave:** Monitorización termo-higrométrica / materia particulada / bioaerosoles / biodeterioro / riesgos para el patrimonio.

## ABSTRACT

*For the correct conservation of the Cultural Heritage, there must be an optimal indoor environmental quality. Monitoring this micro-environment traditionally includes the study of the humidity and temperature of interior spaces, since it is well known that their high values and rapid fluctuations can alter the artistic materials. However, there are many other parameters that must be studied to have a complete view of the potential risks related to Cultural Heritage environments. In this work, we propose the importance of systematic comprehensive monitoring of the indoor environmental quality of a Cultural Heritage asset. It must include parameters such as: temperature, humidity, CO<sub>2</sub>, lighting (UVA and UVB), particulate matter and bioaerosols. The preliminary comparative results of the study carried out in 2009 and ten years later (2019) in the Santos Juanes Church in Valencia are shown, which are part of the previous studies for its coming restoration proposal.*

**Keywords:** Temperature-humidity monitoring / particulate matter / bioaerosols / biodeterioration / Cultural Heritage risks

## I. INTRODUCCIÓN

Diferentes contaminantes físicos, químicos y biológicos pueden alterar la calidad del aire de los espacios interiores. Tanto los factores ambientales como la presencia de polución del aire en ambientes interiores pueden llegar a causar importantes daños en los edificios (ya sean tanto espacios museísticos como monumentos patrimoniales), en los bienes que albergan y pudiendo ser incluso nocivos para la salud humana<sup>1</sup>. De hecho, según la US EPA<sup>2</sup>, en todo el mundo, el 30% de los edificios (nuevos y antiguos) tienen problemas de calidad del aire interior. En algunos casos estos problemas incluso generan el denominado síndrome del edificio enfermo<sup>3</sup>. Por todo ello, es importante mantener una evaluación continua de la calidad del aire en este tipo de espacios de interés histórico-artístico<sup>4</sup>.

El aire, contiene una mezcla de gases y partículas incluyendo microorganismos. Elevados niveles de polución y bioaerosoles junto con condiciones ambientales favorables, se conoce

que aumentan el riesgo potencial de alteraciones físicas, químicas y biológicas en el patrimonio histórico-artístico.<sup>5</sup> Por ello, cada vez, crece la necesidad de incluir, en las tareas de conservación y restauración del patrimonio, estudios integrales de la calidad del aire en ambientes interiores. Estos estudios deben incluir una evaluación, un seguimiento y un control que permita corregir situaciones de riesgo para el patrimonio artístico o para la salud.

El análisis y control del microclima (temperatura, humedad, contenido de agua en el aire, etc.) es imprescindible ya que elevados valores y/o cambios bruscos en estos parámetros pueden causar daños no solo en materiales sensibles higroscópicamente, sino también pueden favorecer el crecimiento de agentes biodeteriorantes, así como la deposición de las partículas en suspensión, la aparición de eflorescencias salinas, etc. Para caracterizar el comportamiento general del ambiente es necesario que la medición continua de los parámetros se realice en varios puntos elegidos oportunamente. Del análisis de los datos así obtenidos, de sus relaciones y dependencias, se podrá llegar a la comprensión del fenómeno microclimático. Existen distintos sistemas industriales tecnológicos muy robustos que permiten su adaptación a la monitorización constante mediante la colocación de sensores en los puntos estratégicos en los Bienes de Interés Cultural (BIC). Para completar las informaciones necesarias, hay que calcular a

- 1 AHMED, T.; USMAN, M.; SCHOLZ, M., “Biodeterioration of Buildings and Public Health Implications Caused by Indoor Air Pollution”, en *Indoor and Built Environment*, vol. 27, n.o 6 (2018), 752-765.
- 2 US EPA, Indoor Facts No.4. (Revised). “Sick building syndrome”. Washington, DC: United States, Environmental Protection Agency, en *Research and development*, (1991) [Consulta: 20-05-20].
- 3 BERENQUER SUBILS, M<sup>a</sup> J., *NTP 289: Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo*. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Ministerio de trabajo y asuntos sociales de España (2019) [Consulta: 20-05-20].
- 4 MARCHETTI, A. , PILEHVAR, S., HART, L., PERNIA, D.L., VOET, O., ANAF, W., NUYTS, G., OTTEN, E., DEMEYER, S., SCHALM, O., DE WAEL, K., “Indoor environmental quality index for conservation environments: The importance of including particulate matter”, en *Building and Environment*, vol. 126 (2017), 132-46.; VIVÓ SORIA, Enrique; BOSCH-ROIG, Pilar; MARCENAC, Valeria; MONTES ESTELLÉS, Rosa M<sup>a</sup>; ROIG PICAZO, Pilar. “Monitorización de las condiciones medioambientales durante la restauración de la Iglesia de San Nicolás”, en *Rehabend* (Euro-American Congress of Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management). Burgos, University of Cantabria, 2016, pp. 864-875.
- 5 LAZARIDIS, M.; KATSIVELA, E.; KOPANAKIS, I.; RAISI, L.; MIHALOPOULOS, N.; PANAGIARIS, G., “Characterization of airborne particulate matter and microbes inside cultural heritage collections”, en *Journal of Cultural Heritage*, vol. 30 (2018) 136-146.

través de oportunos algoritmos, la humedad específica y la temperatura de rocío, que son indicadores indispensables para valorar eventuales fenómenos de evaporación o de condensación.

Así mismo, el control de la intensidad de luz visible y ultravioleta (UVA y UVB) que impacta sobre los BIC también es una variable a tener en cuenta en ambientes interiores, sobre todo en aquellos que poseen pinturas, ya que el impacto de la luz sobre este tipo de materiales sensibles puede afectar a su conservación<sup>6</sup>.

Como hemos comentado anteriormente, existen otros factores ambientales que pueden afectar sustancialmente al deterioro de los BIC como la polución ambiental. La unión de condiciones climáticas desfavorables y elevada polución ambiental, puede afectar muy negativamente al patrimonio, causando las llamadas lluvias “ácidas”, aumentando la deposición de la polución sobre los materiales constitutivos de las obras de arte pudiendo producir oscurecimiento, corrosiones y bio-colonización<sup>7</sup>.

Esta polución, es especialmente importante en el patrimonio urbano, donde la elevada presencia de tráfico rodado, procesos industriales, emisiones de chimeneas, calefacciones de carbón, labores agrícolas, construcción de carreteras... son causantes del aumento de partículas (como la materia particulada: PM) y de gases tóxicos (como el CO<sub>2</sub>). Las PM son partículas en suspensión y están relacionadas con la con-

taminación atmosférica y el deterioro del patrimonio así como con la salud de los técnicos restauradores y de los visitantes. Pueden afectar a la durabilidad del material pétreo y por tanto de las pinturas murales, elementos arquitectónicos, escultóricos y ornamentales de monumentos como las iglesias (Fort, 2003)<sup>8</sup>. La presencia de un contenido elevado de PM en el aire está asociado a un aumento del riesgo para la conservación del patrimonio que incluye: la degradación de los componentes minerales de las rocas que los forman, el ensuciamiento u oscurecimiento de las superficies, incremento de costras negras, corrosión, biodeterioro, etc<sup>9</sup>. Por todo ello, su seguimiento y control con el tiempo es importante en el interior de los BIC<sup>10</sup>. Su medición puede realizarse mediante medidores basados en sistemas de conteo que permiten conocer el número de partículas de diferentes tamaños por metro cúbico de aire. Las PM están formadas por una mezcla compleja de partículas de distinta composición química (carbón, hidrocarburos, sílice, sulfato de amonio, nitratos, metales como el plomo, hierro, aluminio o cadmio, plaguicidas, dioxinas) y de diversa naturaleza física (suspensiones de sólidos o gotas de líquido) y biológica (presencia de microorganismos, esporas, ácaros...) que presentan formas y tamaños variables. Las PM agrupan las partículas con diámetro desde menores de 0,1 micras a 50 micras, ya que las de tamaño superior se depositan

- 6 CUTTLE, C., “Damage to Museum Objects Due to Light Exposure”, en *International Journal of Lighting Research and Technology*, vol. 28, n.o 1 (1996), 1-9.
- 7 VIDAL, F.; VICENTE, R.; SILVA J.M., “Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention” en *Journal of Cultural Heritage*, vol. 37 (2019) 273-295.
- 8 FORT, R.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M.; MINGARRO, F.; LÓPEZ DE AZCONA, M.C., “Chemical processes of alteration on the surface of building stones by antropogenic contamination”, en *ResearchGate* (2003), 450-457.
- 9 BÖKE, H.; GOKTURK, H.; CANER-SALTIK, E.; DEMIRCI, S., “Effect of Airborne Particle on SO<sub>2</sub>-Calcite Reaction” en *Applied Surface Science*, vol. 140 (1999) 70-82.; DEL MONTE, M.; SABBIONI C.; VITTORI, O., “Airborne carbon particles and marble deterioration”, en *Atmospheric Environment*, n.o 15 (1981), 645- 652.; DEL MONTE, M.; LEFÈVRE, R. A., “Particulate matter in the urban atmosphere”, en *Sciences and Technologies of the materials and of the environment for the protection of stained glass and stone monuments*, Research Report n.o 14 (2001), 99-107.; DOLSKE, D.A., “Deposition of atmospheric pollutants to monuments, statues and buildings”, en *The Science of the Total Environment*, vol. 167, n.o 1 (1995) 15-31.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; SEBASTIAN, E., “Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation”, en *The Science of Total Environment*, vol. 187, n.o 2 (1996) 79-91.
- 10 NAZAROFF, W.; LIGOCKI, M. P.; SALMON, L.G.; CASS, G. R.; FALL, T.; JONES, M.C.; LIU, H. I. H.; MA, T., *Airborne Particles in Museums*. Los Angeles, Getty Conservation Institute, Research in Conservation 6, 1993, pp 97-115.

por gravedad. Cuanto mayor es el tamaño de las partículas, menor es el tiempo que permanecen suspendidas en el aire y menores son las distancias capaces de recorrer. Los gradientes termohigrométricos entre el soporte artístico y el aire ambiente, es causa directa e indirecta del proceso micro-físico que puede aumentar la deposición, el tamaño y la composición de las partículas, por ello es imprescindible complementar este estudio con el estudio termo-higrométrico de la iglesia<sup>11</sup>.

Por último, el estudio de los bioaerosoles, es otro factor clave a tener en cuenta. Consiste en controlar la cantidad de microorganismos presentes en el aire interior. Una excesiva carga microbiana en el aire conlleva un riesgo de biodeterioro en los materiales susceptibles y expuestos a condiciones ambientales favorables para su desarrollo. Este riesgo viene también determinado por el tipo de microorganismos presentes, así como de los factores ambientales climáticos (T<sup>a</sup>, HR%, ventilación, fluctuaciones...) del espacio interior. Los principales agentes causantes del biodeterioro de las obras de arte son: bacterias y hongos. Afectan a todo tipo de materiales, pudiendo producir cambios de color, manchas, pérdida de resistencia de los materiales, corrosión de metales, pudrición, etc. Así mismo una elevada presencia de microorganismos en el aire puede ocasionar riesgos para la salud de las personas que trabajan o visitan esos ambientes contaminados. Esto sucede, por ejemplo, cuando los microorganismos presentes producen toxinas. Sin embargo, los efectos adversos en la salud son muy variables y dependen

de múltiples factores como la susceptibilidad de las personas, el grado de exposición, pudiendo generar inflamación, alergias, asma, tos y otras respuestas tóxicas<sup>12</sup>. Existen distintos equipos tecnológicos que permiten realizar el conteo del número de hongos y bacterias por metro cúbico de aire. Distintos estudios muestran cómo la carga microbiológica en el interior de monumentos varía considerablemente con las estaciones, por ello un control integral de un monumento debe incluir un muestreo estacional<sup>13</sup>.

En este artículo, se propone una metodología de monitorización integral de la calidad del aire del interior de monumentos que incluye la toma de datos sistemática y el seguimiento estacional de las siguientes variables: temperatura ambiente y superficial, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, UVA, UVB, PM y bioaerosoles. Esta propuesta se basa en los datos de la monitorización preliminar realizada (2019) durante los estudios previos para la restauración de la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia. Estos resultados preliminares son muy importantes para poder detectar los parámetros de riesgo actuales y poder preparar la propuesta de monitorización integral presentada. Así mismo se muestra una comparativa con los datos obtenidos hace diez años (2009)<sup>14</sup>.

## 2. LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUANES

La Iglesia de los Santos Juanes en Valencia, surge en 1240 tras la reconquista. Este templo se construyó, en un inicio, como una mezquita, conocida como la mezquita de la Boatella. A lo largo de los años, ha sufrido varias intervenciones

- 11 CAMUFFO, D.; COCCEO, C.; STURARO, G., “Corrections of Systematic Errors, Data Homogenisation and Climatic Analysis of the Padova Pressure Series (1725-1999)”, en *Climatic Change*, vol. 78, n.º 2 (2006), 493-514.; FANG, G.C.; WU, Y.S.; CHANG, S.Y.; RAU, J.Y.; HUANG, S.H.; LIN, C.K., “Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site”, en *Toxicology and Industrial Health*, 22 (2006), 2-37.; VIVÓ SORIA, E., Tesis Doctoral: *Metodología de análisis y técnicas aplicadas a la conservación preventiva en el ámbito del estudio microclimático de Bienes de Interés Cultural*. Valencia, Dpto. Conservación y Restauración de Bienes Culturales de la Universidad Politécnica de Valencia, 2015, pp. 87-90.
- 12 AHMED, T. et al, *op. cit.*, 2018, 752-765.
- 13 LAZARIDIS, M.; KATSIVELA, E.; KOPANAKIS, I.; RAISI, L.; PANAGIARIS, G.. “Indoor/Outdoor Particulate Matter Concentrations and Microbial Load in Cultural Heritage Collections”, en *Heritage Science*, vol. 3, n.º 1 (2015), 34.
- 14 BOSCH ROIG, M<sup>a</sup>. P., *Caracterización del biodeterioro y desarrollo de nuevos tratamientos de limpieza aplicables a los frescos restaurados de Antonio Palomino en la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia*. S.l.: Editorial Universitat Politècnica de València, 2011, pp. 80-90 y 122-135.

a causa de sus múltiples incendios, dando como resultado la superposición de diferentes estilos arquitectónicos<sup>15</sup>. La última reconstrucción fue llevada a cabo en los siglos XVII y XVIII, transformándola en un templo Barroco, abandonando así el Gótico original que lo precedía. El estado actual de conservación lo conforman una serie de restauraciones que se llevaron a cabo con la intención de paliar los daños surgidos tras el último incendio en 1936, durante la Guerra Civil Española. Este fuego afectó de manera directa a las pinturas murales, al retablo mayor y la decoración escultórica entre otros. Aún así, este templo precisa de una intervención integral, así como un seguimiento periódico para asegurar el buen estado de conservación.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Monitorización medioambiental preliminar

Para realizar la labor de toma de datos y seguimiento de las diferentes variables microclimáticas en la Iglesia de los Santos Juanes, se realiza un estudio preliminar mediante el uso de dataloggers (TZ-TempU03).

#### 3.2. Monitorización de la materia particulada

La medición de las partículas en suspensión se realizó mediante un Contador de Partículas móvil: Airy Technology P311 (Fig. 1 derecha). Este equipo permite un sistema dinámico de muestreo donde el análisis se realiza en el propio instrumento y la concentración de partículas existentes en el volumen de aire evaluado se obtiene en tiempo real. Este estudio se ha realizado en 15 puntos midiendo el número de partículas por minuto obteniendo el recuento diferencial ( $\Delta$  PM) de las partículas del aire.

#### 3.3. Monitorización de bioaerosoles

El estudio de la contaminación microbiológica del aire se realizó mediante el equipo SAS



Fig. 1-. Equipos de medición: SAS (izquierda) y Airy Technology (derecha), durante la toma de muestra en la Iglesia de los Santos Juanes.

(Surface Air System) SUPER 100/180 (Fig. 1 izquierda). Dicho equipo aspira un caudal de aire controlado (100L), permitiendo un estudio cuantitativo, este caudal de aire impacta sobre la superficie de placas petri con medios de cultivo específicos para el aislamiento de hongos (Sabouraud con Cloranfenicol) y de bacterias (Plate Count Agar). Las muestras son incubadas en estufas a 28°C durante 7 y 3 días respectivamente. Tras la incubación se cuentan las colonias de hongos (Fig. 2, a) y bacterias crecidas (Fig. 2, b) y se expresan los resultados como Unidades formadoras de colonias por m<sup>3</sup> de aire (UFC/m<sup>3</sup>). Este control se ha realizado en 15 puntos (los mismos que en el control de partículas en suspensión).

#### 3.4. Análisis estadístico

De los datos obtenidos, se calculan los promedios de los dos espacios estudiados (interior, exterior) y de las estaciones analizadas (otoño, invierno y primavera). Así mismo se realizan comparativas de los datos tomados y de las distintas anualidades (2009 y 2019). Para la valoración de los resultados de las comparativas, se

<sup>15</sup> BOSCH ROIG, M<sup>a</sup>. P.: *op. cit.*, 2011, pp. 1-7.

utiliza la prueba estadística “Test de Student”. Esta prueba, permite valorar si la diferencia de la media entre las dos muestras comparadas es estadísticamente significativa y con ello determinar si las dos muestras poseen distribuciones de probabilidad de la media distinta o no. Proporcionando un valor denominado p-valor que, se compara con un valor de referencia establecido en 0,05. Si el p-valor obtenido es menor de ese valor (0,05), se puede rechazar la hipótesis nula que establece que los dos grupos de datos estudiados se comportan de la misma manera.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Selección de los puntos de muestreo

Se ha realizado en base a las características de los espacios de la Iglesia, así como a su orientación. Seleccionando 15 puntos de muestreo (Fig. 3 izquierda): 2 puntos en la en la capilla de la Comunión, 10 puntos en la nave central (Capilla de san Francisco de Paula, Capilla del Patriarca San José, Capilla de Santa Rita de Casia, Capilla de la Virgen de los Desamparados, puerta Oeste, Capilla del Santísimo Cristo de los Afligidos, Capilla de Nuestra Señora del Pilar, Capilla de San Antonio Abad, presbiterio y centro de la nave) y 3 puntos en el exterior de la iglesia (Calle Vieja de la Paja, Plaza de la Comu-

nión de San Juan, Plaza de Brujas). Las tomas de muestra se han realizado por estaciones.

##### 4.2. Análisis termo-higrométrico

Los resultados preliminares muestran que los valores medios de temperatura del interior de la iglesia en 2019 en las estaciones analizadas son similares a los valores obtenidos en 2009 (entre 1,0 °C y 4,2 °C más), mientras que los valores medios estacionales de humedad relativa son significativamente mayores en 2019 respecto a 2009 (entre 8,2% y 23,9% más). Aunque los valores medios anuales son similares (ver Tabla 1).

Esta primera campaña de medidas nos permite tener una idea global de las temperaturas medias del interior de la iglesia en las estaciones analizadas, sin embargo, es una información parcial e incompleta. Así mismo estos datos muestran valores medios elevados sobretodo en verano que deberían ser analizados con mayor precisión debido a que podría suponer un posible riesgo.

##### 4.3. Análisis de las partículas en suspensión

Los análisis preliminares realizados en 2019 muestran que la cantidad de partículas presentes en la iglesia de los Santos Juanes son muy

Estación/año	Temperatura (°C)	HR (%)
verano/2009	28,3	52,0
verano/2019	26,7	60,6
otoño/2009	21,7	43,0
otoño/2019	22,7	54,7
invierno/2009	12,0	40,0
invierno/2019	16,2	63,9
media 2009	21,1	56,2
media 2019	21,8	56,2

Tabla 1. Valores medios estacionales y anuales (2009 y 2019) de temperatura y humedad relativa en el interior de la Iglesia.



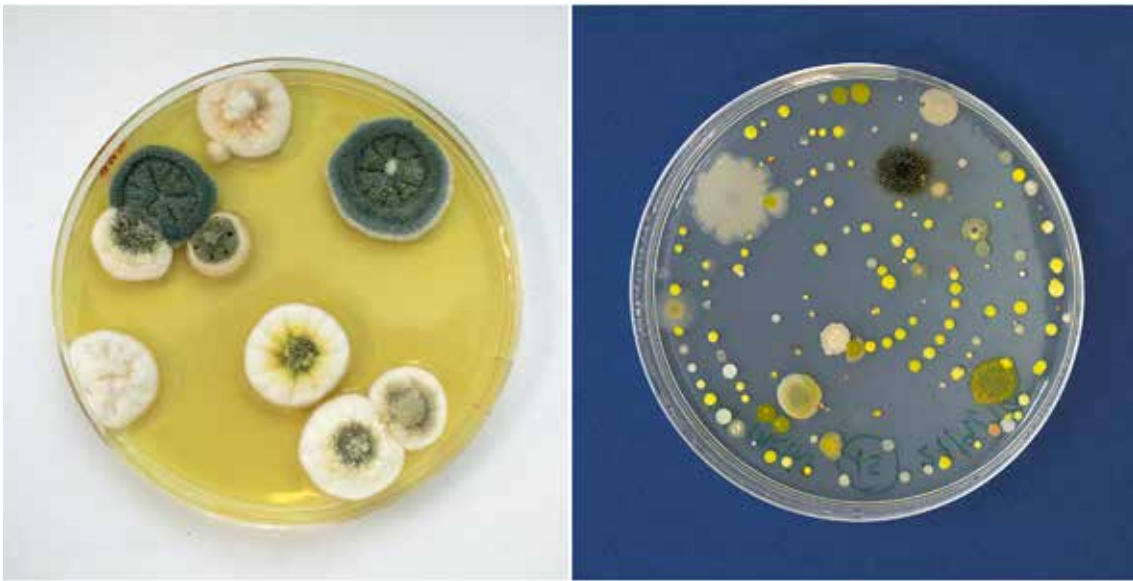


Fig. 2-. Placa petri con: a) colonia de hongos (izquierda) y b) colonia de bacterias (derecha) de uno de los puntos de muestreo del interior de la Iglesia de los Santos Juanes.

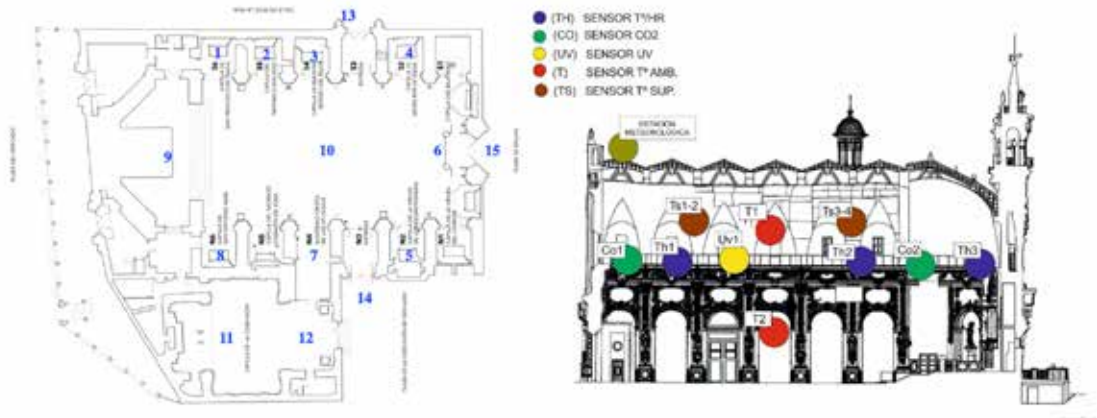


Fig. 3-. Plano de la localización de puntos de toma de muestras de aire (izquierda) y del sistema de control ambiental sensorizado (derecha). (Levantamiento planimétrico: Arq. C. Campos).

variadas en función del tipo de partícula, de los espacios y de las estaciones.

Existen legislaciones europeas que regulan la cantidad de partículas en el aire (no en interiores). Entre ellas se encuentra la Directiva 80/779/CEE, cuyos límites deben cumplirse

cada año, y la Posición Común nº 57/98, documento 9272/98 que establece unos límites a largo plazo<sup>16</sup>.

Sin embargo, no existe una normativa específica sobre la cantidad de partículas que suponen una buena calidad de aire en espacios

<sup>16</sup> SALVADOR MARTÍNEZ, P.; ARTIÑANO RODRÍGUEZ DE TORRES, B.: "Características físico-químicas de las partículas", CIEMAT (ed.): *Evaluación de la Contaminación Atmosférica Producida por Partículas en Suspensión en las Redes de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid*. Madrid, Departamento de Impacto Ambiental de la Energía, 2000, pp. 57-67.

museísticos o iglesias. Lo que sí existe es una norma UNE 171330-2:2014<sup>17</sup> que describe la metodología para realizar la inspección de calidad ambiental en interiores. Según esta normativa de calidad de aire en ambientes interiores, las partículas de 0,5 $\mu$ m deben tener un conteo inferior de 35.200.000 partículas/m<sup>3</sup> y las partículas de 5,0 $\mu$ m deben tener un conteo menor de 293.000 partículas/m<sup>3</sup>. Así mismo, según los criterios de conformidad de la calidad ambiental al menos el 75% de los puntos analizados se deben encontrar por debajo del valor límite. Los datos obtenidos en el estudio preliminar de 2019 muestran, en los puntos analizados y en todas las estaciones medidas, valores similares y por debajo de los valores límites recomendados para partículas de 0,5 $\mu$ m y 5,0 $\mu$ m.

La Fig. 4 muestra los valores medios de cantidad de partículas de cada tipo en las 2 zonas y las 3 estaciones estudiadas en 2019. Dado que los valores de las partículas de 0,3 $\mu$ m son tan elevados, se han simplificado las gráficas mostrando los valores comprendidos entre 0 y 14.000.000 partículas por minuto.

Los datos muestran que, las partículas más abundantes son las más pequeñas (0,3 $\mu$ m) y las partículas menos abundantes son las más grandes (5,0 $\mu$ m). Esto se entiende ya que el tamaño va ligado al peso y a mayor peso más probabilidad de que se depositen por gravedad y sean limpiadas.

Comparando las estaciones, observamos cómo tanto en interior como en exterior, otoño es la estación con los valores de los 3 tipos de PM estudiadas más bajos. Así mismo en esta estación observamos que todas las partículas son más abundantes en el interior respecto del exterior. Lo mismo ocurre en invierno con las partículas de 0,3 $\mu$ m y en verano con las partículas de 5,0 $\mu$ m. Las partículas de 0,5 $\mu$ m muestran

sin embargo un mayor contenido en el exterior respecto al interior tanto en verano como en invierno. En cambio, en las partículas de 5,0 $\mu$ m hay mayor acumulación en el interior en verano y en otoño, pero menor en invierno.

#### 4.4. Análisis microbiológico del aire

En el caso de iglesias, monumentos y espacios museísticos, tampoco existe legislación ni normativa sobre límites en relación con los niveles de hongos y bacterias. Pero sí se dispone de recomendaciones y normas internacionales para otros ambientes interiores de forma genérica, por lo que los resultados se han comparado con estas recomendaciones. Respecto a los valores recomendados de flora microbiana mesófila total en ambientes interiores, la norma UNE 100012:2005<sup>18</sup>, indica que el valor debe ser menor de 800 UFC/m<sup>3</sup>". Por encima de estos valores se recomienda tomar medidas correctoras. Respecto a los valores de hongos en el aire interior, la norma UNE 171330-2:2014<sup>19</sup>, establece que la cantidad máxima de hongos en espacios interiores laborables debe ser menor de 200 UFC/m<sup>3</sup> para hongos y menor de 600 UFC/m<sup>3</sup> para bacterias. Además, indica que al menos el 75% de los puntos analizados se debe encontrar por debajo de los valores límite.

Según los resultados obtenidos (2019) de la cantidad media de hongos (Fig. 5, a) en el interior de la iglesia observamos que se encuentran dentro de los límites recomendados (<200 UFC/m<sup>3</sup>), tanto en verano (176 UFC/m<sup>3</sup>) como en otoño (84 UFC/m<sup>3</sup>). Sin embargo, en invierno la cantidad de hongos supera los límites de confort establecidos, llegando a obtener una media de 830 UFC/m<sup>3</sup>. A pesar de estos resultados, tanto en verano como en invierno, el 75% de los puntos analizados superan el límite recomendado.

Los datos medios de los hongos en el inte-

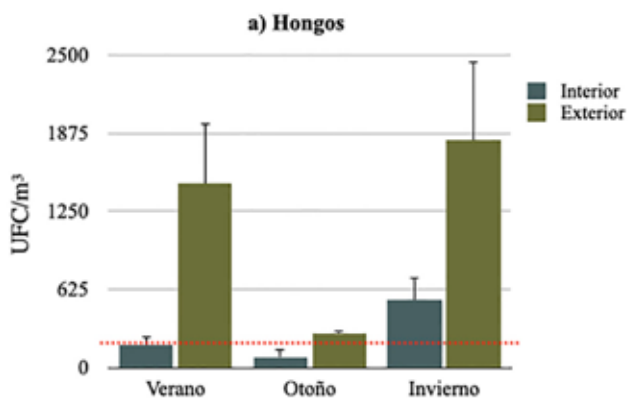
<sup>17</sup> AENOR, *Calidad ambiental en interiores. Parte 2: Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior*. UNE 171330-2:2014. Madrid: AENOR (2014).

<sup>18</sup> AENOR, *Higienización de sistemas de climatización*. UNE 100012:2005. Madrid: AENOR (2005).

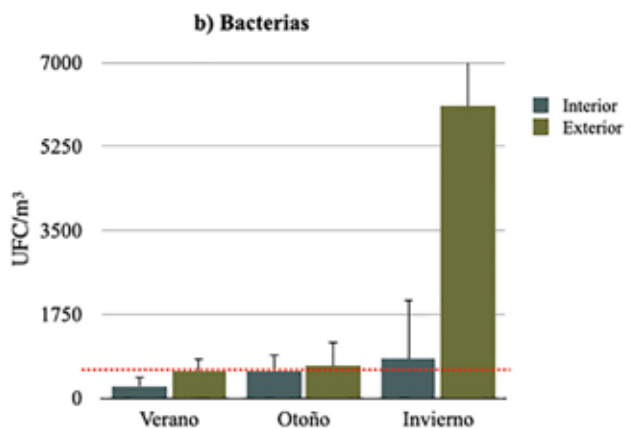
<sup>19</sup> AENOR, *op. cit.*, 2014.



UFC/m <sup>3</sup> de Hongos		
	Interior	Exterior
Verano	176	1473
Otoño	84	273
Invierno	538	1817



UFC/m <sup>3</sup> de Bacterias		
	Interior	Exterior
Verano	251	570
Otoño	553	687
Invierno	830	6103



Flora microbiana mesófila		
	Interior	Exterior
Verano	427	2043
Otoño	638	960
Invierno	1368	7920

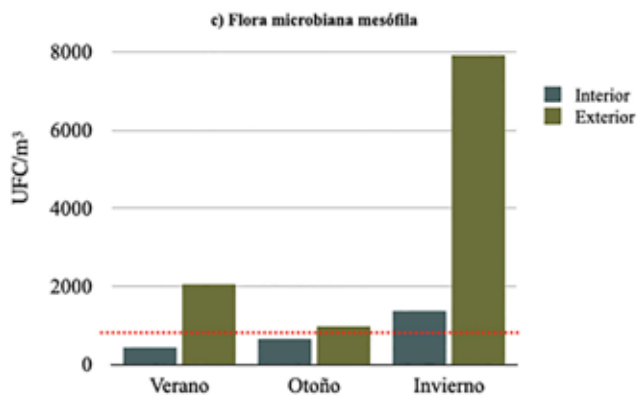


Fig. 5-. Gráfico de barras mostrando los valores medios de a) hongos, b) bacterias y c) la flora microbiana mesófila (UFC/m<sup>3</sup>) presentes en el aire del interior y del exterior de la Iglesia de los Santos Juanes (2019). La línea de puntos roja indica los límites recomendados.

rior de la iglesia muestran variaciones estadísticamente significativas entre unas estaciones y otras (p-valores < 0,05). Excepto entre verano e invierno, donde la variación de resultados no es significativa (p-valor 0,4967).

Algunos autores defienden que niveles medios de microorganismos entre 10-100 UFC/m<sup>3</sup> son niveles normales en una atmósfera limpia y cantidades superiores a 150 UFC/m<sup>3</sup> es cuando pueden causar problemas de salud<sup>20</sup>. Si seguimos a estos autores, los niveles medios de hongos en otoño en el interior de la iglesia (84 UFC/m<sup>3</sup>) presenta niveles normales, mientras, en verano en el interior (176 UFC/m<sup>3</sup>) están un poco por encima del valor límite medio recomendado. Aunque hay que tener en cuenta que otros autores defienden que estos niveles varían en función del tipo de microorganismo<sup>21</sup>.

En cuanto a las bacterias (Fig. 5, b), la mayoría de los valores medios en los espacios interiores presentan niveles dentro de las recomendaciones (600 UFC/m<sup>3</sup> +25% del total), además de cumplir en todo momento la norma UNE 100012:2005<sup>22</sup> en la que se especifica que “el aire interior no debe contener una concentración de bacterias superior a 200 UFC/m<sup>3</sup> respecto a la concentración exterior”. En verano se ha contabilizado una media de 251 UFC/m<sup>3</sup> (cuyos puntos de muestreo cumplen los límites en el 90,9% de los casos) y en otoño 553 UFC/m<sup>3</sup> (que tan solo cumple los límites el 58,33% de los puntos de muestreo). En invierno, por el contrario, las cifras aumentan sobrepasando las recomendaciones establecidas (830 UFC/m<sup>3</sup> en el interior) lo que concuerda con un aumento también en la contaminación bacteriana del exterior (6.103 UFC/m<sup>3</sup> en el exterior). Los cambios entre los valores medios producidos en el interior de la iglesia no son significativos ni

entre otoño e invierno (p-valor 0,133) ni entre verano e invierno (p-valor 0,4571), pero entre verano y otoño si existe un cambio significativo (p-valor 0,0226).

Los valores medios de flora mesófila total (Fig. 5, c) en el interior de la iglesia cumple con los límites recomendados tanto en verano (427 UFC/m<sup>3</sup>) como en otoño (638 UFC/m<sup>3</sup>), los valores están dentro de las recomendaciones, mientras que en invierno se encuentran muy por encima (1.368UFC/m<sup>3</sup>).

Comparando los resultados obtenidos en 2019 con los resultados de los análisis microbiológicos realizados en año 2009 (Tabla 2), se observa cómo en verano y en invierno los valores de hongos y bacterias actuales han aumentado con respecto al año 2009, mientras que en otoño han disminuido. En cuanto a las bacterias, se contemplan cambios significativos estadísticamente (p-valor 0,0001) en verano (251 UFC/m<sup>3</sup> actualmente y 150 UFC/m<sup>3</sup> hace 10 años), al igual que en invierno (830 UFC/m<sup>3</sup> en 2019 y 331 UFC/m<sup>3</sup> en 2009; p-valor 0,0001). En otoño, la cantidad de hongos en 2019 es menor que los contabilizados en 2009 (553 UFC/m<sup>3</sup> y 606 UFC/m<sup>3</sup> respectivamente) lo que supone un cambio significativo estadísticamente (p-valor 0,001). Los hongos muestran los mismos cambios que las bacterias. En verano hay un aumento significativo (p-valor 0,035) estadísticamente (176 UFC/m<sup>3</sup> en 2019 y 156 UFC/m<sup>3</sup> en 2009). En otoño los valores actuales son significativamente (p-valor 0,0005) menores que en 2009 (84 UFC/m<sup>3</sup> en 2019 y 121 UFC/m<sup>3</sup> en 2009). Por último, en invierno, hay un aumento estadísticamente significativo (p-valor 0,0001), puesto que en 2019 los valores alcanzaban los 538 UFC/m<sup>3</sup>, frente a las 100 UFC/m<sup>3</sup> contabilizadas en el año 2009.

20 CURTIS, L.; LIEBERMAN, A.; STARK, M.; REA W.; VETTER, M., “Adverse Health Effects of Indoor Moulds”, en *Journal of Nutritional & Environmental Medicine*, vol. 14, n.o 3 (2004), 261-274.; KOWALSKI, W.J., “Indoor mold growth. Health hazards and remediation”, en *HPAC Engineering*, vol. 72 (2000), pp. 80-83.

21 KUHN, D.M.; GHANNOUM, M.A., “Indoor mold, toxigenic fungi and stachybotrys chartarum: infectious disease perspective”, en *Clinic Microbiology Reviews*, vol. 16 (2003), pp. 144-172.

22 AENOR: *op.cit.*, 2005.

	2009			2019		
	Hongos	Bacterias	Flora mesófila total	Hongos	Bacterias	Flora mesófila total
Otoño	121	606	727	84	553	637
Invierno	100	331	431	538	830	1.368
Verano	156	150	306	176	251	427

Tabla 2. Comparativa de valores medios de microorganismos presentes en el interior de la Iglesia de los Santos Juanes en 2009 y 2019

## 5. PROPUESTA DE MONITORIZACIÓN INTEGRAL

Tras el estudio preliminar de la calidad del aire realizado en la iglesia, y vistos los niveles medios elevados tanto de Temperatura, PM como de bioaerosoles, se considera importante la realización de una monitorización integral de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.

Consideramos importante que ésta incluya parámetros termo-higrométricos, contaminantes presentes en el aire (bioaerosoles, polución y partículas en suspensión) y la luz. La monitorización sistémica de estos parámetros permitirá actuar a tiempo para disminuir los riesgos.

Para ello se propone (tanto durante como tras el proceso de restauración programada en la iglesia), seguir con el control trimestral tanto de los bioaerosoles como de las PM e incluir una instalación de un sistema automático de control ambiental sensorizado que permita la medición y almacenamiento de datos ambientales.

Este sistema contará con una red de 16 sensores, incluyendo sensores combinados de temperatura y humedad relativa, de temperatura ambiental, de temperatura superficial, de CO<sub>2</sub> y de radiación ultravioleta (UVA y UVB). Éstos estarán convenientemente situados en el interior de la iglesia, en 10 puntos elegidos que permiten cubrir todos los espacios de la iglesia (Fig. 3 derecha). También se instalará una estación meteorológica completa en el exterior de la Iglesia que mide 10 parámetros (T<sup>a</sup>, HR, índice UV, etc.). El sistema realizará medidas au-

tomáticas cada 5 minutos e incluirá un equipo central con un PC que controlará toda la instalación, con el software de control para la interpretación y procesamiento de los datos recibidos por los sensores. Se dispondrá de sistema de telecontrol vía Internet que permitirá una previsualización de los datos en tiempo real. Con la gran cantidad de datos obtenidos será necesario emplear análisis mediante gráficas de nube de puntos y de evolución diaria, mensual y anual de los valores de temperatura y humedad relativa del ambiente interior de la iglesia. Estas gráficas permiten evaluar y controlar las condiciones para evitar que sean favorables para el crecimiento biológico (HR > 65% y T<sup>a</sup> > 25°C), para la deposición de partículas (HR y T<sup>a</sup> elevadas favorecen la deposición de partículas en suspensión) o para la cristalización de sales y formación de eflorescencias salinas sobre los materiales artísticos (la transición de fase anhidro-hidro de las sales depende también de T<sup>a</sup> y HR) (ejemplos en Fig. 4). El análisis de estos datos nos permitirá aplicar las formulaciones existentes en las diferentes normativas (centradas en el grado de fluctuaciones)<sup>23</sup> que regulan las condiciones de temperatura y humedad adecuadas para la correcta conservación preventiva del patrimonio.

## 6. CONCLUSIONES

Del estudio integral preliminar de calidad del aire realizado recientemente en la iglesia de

Santos Juanes de Valencia podemos llegar a las siguientes conclusiones:

El estudio **termo-higrométrico** preliminar muestra la existencia de temperaturas demasiado elevadas en verano tanto en 2009 como en 2019, lo que implica un posible riesgo para el BIC y sus materiales constituyentes. Estos posibles riesgos deben ser analizados en profundidad para lo que se considera necesaria la instalación de un sistema automático de medición y almacenamiento de datos ambientales<sup>24</sup>.

Los datos preliminares de **partículas en suspensión** analizados indican que sus valores son muy variables en función a la estación y el tipo de partícula, como ya han mostrado otros estudios<sup>25</sup>. Aunque los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites recomendados por las normativas existentes para la calidad del aire en espacios interiores. Sin embargo, estas normativas regulan riesgos para la salud de los trabajadores, pero no para el patrimonio, pese a que se conoce que están implicadas en importantes deterioros de los materiales constituyentes de los BIC y aceleradas por las condiciones ambientales<sup>26</sup>. Por ejemplo, el ennegrecimiento de las pinturas murales puede ser disminuido reduciendo los procesos de deposición de partículas, así como la concentración de estas suspendidas

en el aire y esto se puede conseguir actuando sobre el nivel térmico, reduciendo la diferencia térmica entre la pared y el aire. Por lo que se considera muy recomendable llevar un seguimiento estacional tanto del microclima como de las PM durante el proceso de restauración, para valorar la presencia de posibles riesgos para las pinturas murales y ornamentaciones presentes en la iglesia. Así mismo se ha descrito que existe una relación entre el aumento de polución (gases inorgánicos como el SO<sub>2</sub> y el NO<sub>x</sub>) y la formación de la fracción de partículas finas (0-10µm) en ambientes urbanos (US EPA 1982)<sup>27</sup>. Estas partículas junto al hollín (formados principalmente de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa) participan en la formación de las deposiciones oscuras (Salvador y Artíñano, 2000)<sup>28</sup>. Por ello hemos incluido en el sistema de monitorización integral propuesto, la inclusión de sensores que nos aporten datos sobre esta polución (CO<sub>2</sub>).

Respecto a los datos preliminares de **contaminación microbiológica del aire** interior de la iglesia muestran valores por encima de los límites recomendados en invierno 2019. Sin embargo, al compararlo con los datos medios obtenidos en 2009 vemos que estaban todos ellos dentro de los límites. Este aumento de

23 AENOR, *Especificaciones de temperatura y humedad relativa para limitar los daños mecánicos causados por el clima a los materiales orgánicos higroscópicos*. UNE-EN 15757:2011. Madrid: AENOR (2010); ASHRAE, *Museums, Galleries, Archives, and Libraries*. A chapter in Handbook HVAC Applications. American Society of Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers. EE.UU (1999, 2003, 2007) [Consulta: 24-05-20]; UNI, *Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi*. UNI 10829. Italia (2010). UNI, *Documentazione. Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti*; UNI 10586:1997. Milano, Ente Nazionale Italiano di Unificazione Milano (1997); UNI, 10969:2002. *Beni culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni*. UNI 10969:2002. Italia (2002); UNI, *Beni culturali - Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti*. UNI 1120:2004. Italia (2004); UNI, *Beni culturali - Misurazione in campo dell'umidità dell'aria*. UNI 1131:2005. Italia (2005).

24 GROSSI, CM.; BRIMBLECOMBE, P.; MENÉNDEZ, B.; BENAVENTE D.; HARRIS, I.; DÉQUÉE, M., "Climatology of Salt Transitions and Implications for Stone Weathering", en *Science of The Total Environment*, vol. 409, nº 13 (2011), pp. 2577-2585.

25 PERRONE, M.G.; GUALTIERI, M.; CONSONNI, V.; FERRERO, L.; SANGIORGI, G.; LONGHIN, E.; BALLABIO, D.; BOLZACCHINI, E.; CAMATINI, M., "Particle size, chemical composition, seasons of the year and urban, rural or remote site origins as determinants of biological effects of particulate matter on pulmonary cells", en *Environmental Pollution*, vol. 176 (2013), pp. 215-27.

26 NAZAROFF, W. et al., *op cit.*, 1993, pp. 114-118.

27 US EPA, *Air quality criteria for particulate matter and sulfur, volume II*. Environmental Protection Agency, en *Research and development*, (1982) [Consulta: 24-05-20].

28 SALVADOR MARTÍNEZ, P. et al., *op. cit.*, 2000, pp. 10-41.

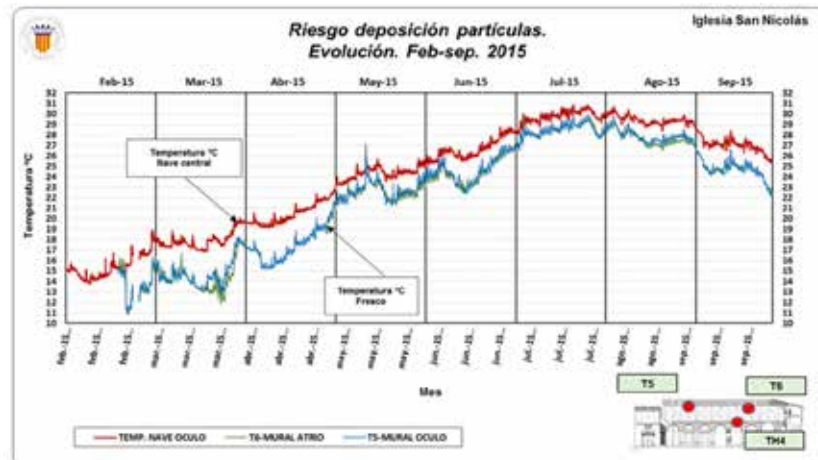
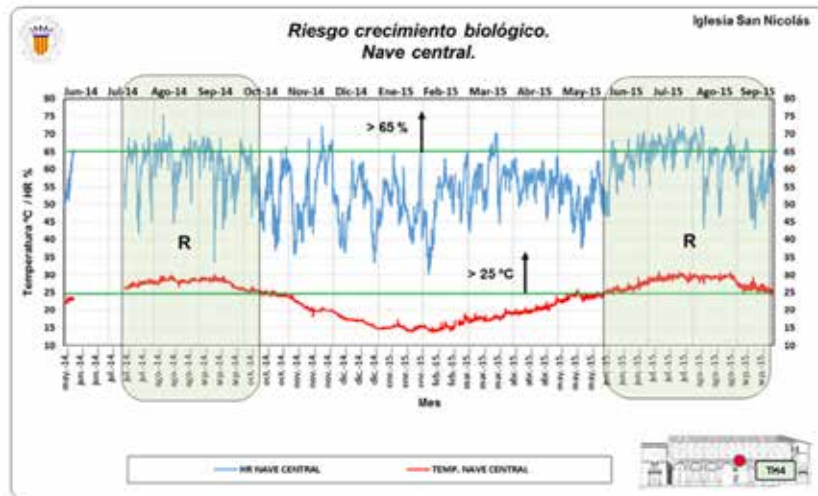
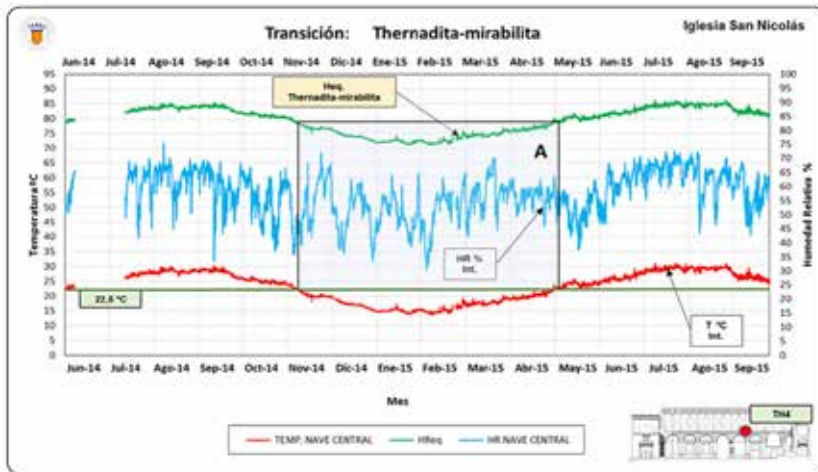


Fig. 6.- Ejemplos de gráficas de análisis temporal de riesgos de crecimiento biológico (arriba), riesgo de deposición de partículas (centro) y riesgo de cristalización de sales (abajo). R: Riesgo; A: zona sensible de posible riesgo\*

\*VIVÓ SORIA, E.: op. cit., 2015, pp. 386, 395 y 513.



bioaerosoles se correlaciona con las condiciones termo-higrométricas, con probables déficits en los sistemas de limpieza y de ventilación, así como a un aumento importante de fieles y turistas desde que se incluyó la misma en diversos recorridos turísticos de la ciudad.

Esta presencia de valores elevados de microorganismos en el aire hace necesario extremar las precauciones, aumentar el uso de sistemas que reduzcan la temperatura ambiental mediante ventilación o sistemas de climatización, e incluso, incrementar las labores de limpieza general para la eliminación de partículas o microorganismos que se hayan podido depositar sobre alguna superficie<sup>29</sup>. La mejora de las condiciones climáticas es mucho más importante que aplicar biocidas o realizar limpiezas con productos tóxicos (lejía...). De hecho, la limpieza del templo es importante que se realice mediante productos no tóxicos, ya que el uso de este tipo de productos, aumentan la polu-

ción de los ambientes interiores empeorando por tanto la calidad del aire. Por último, es muy importante aumentar la conciencia social de la importancia del control de la calidad del aire en el interior y seguir realizando monitorizaciones e inspecciones regulares (estacionales) para conocer si están siendo efectivas esas medidas de corrección empleadas<sup>30</sup>.

En conclusión, consideramos necesario incluir dentro de las actuaciones de restauración de la iglesia de los Santos Juanes, así como de cualquier BIC, protocolos integrales de monitorización que permitan una correcta “conservación preventiva y programada”, que dirija la acción al microambiente. El objetivo final de esta propuesta de monitorización integral es, por tanto, una acción de prevención que pretende ayudar a disminuir, cuanto sea posible, la velocidad de los procesos de degradación, interviniendo donde sea necesario, con tratamientos de mantenimiento apropiados en los diferentes tipos de materiales.

Los autores desean mostrar su más sincero agradecimiento a aquellos que han colaborado para que esta investigación de haya podido llevar a cabo. Agradecemos a la Fundación Hortensia Herrero, al Arzobispado de Valencia y en especial a la Real Parroquia de los Santos Juanes de Valencia por la confianza que han depositado en nuestro equipo. Agradecemos así mismo al Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València y su laboratorio de biodeterioro por su apoyo e interés, así como al Arq. Carlos Campos González, Director facultativo de la restauración arquitectónica, a la Dra. Pilar Roig Directora facultativa de la restauración pictórico-escultórico-ornamental y a Dr. José Luis Regidor responsable de la restauración pictórico-escultórico-ornamental por darnos su apoyo y su asentimiento que hizo posible que este proyecto se haya llevado a cabo. También, agradecemos al párroco Don Gonzalo Albero de la Iglesia de los Santos Juanes por facilitarnos el acceso a todos los espacios y poder llevar a cabo todas las mediciones necesarias para el desarrollo del proyecto.

<sup>29</sup> VAILLANT CALLOL, M.; VALENTÍN RODRIGO, N.; DOMENECH CARBÓ, M.T., *Una mirada hacia la conservación preventiva del patrimonio cultural*. Valencia, Editorial UPV, 2003, p. 322.

<sup>30</sup> AHMED, T.; USMAN, M.; SCHOLZ, M.: *op. cit.*, 2018, pp. 752-765.