

MODELO ACÚSTICO DE LA BASÍLICA DEL REAL MONASTERIO DE SAN LORENZO DEL ESCORIAL

María Larrosa Navarro^{1*}
Antonio Pedrero González¹
Daniel de la Prida Caballero²

¹Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040, Madrid, España

²Department of Signal Theory and Communications, Universidad Carlos III de Madrid, Avd. de la Universidad 30, 28911, Leganés, España

RESUMEN

El Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial es un lugar de suma importancia en la historia musical española. El recinto más relevante de este complejo arquitectónico es la basílica, donde los monjes jerónimos pasaban un mínimo de ocho horas diarias llevando a cabo el oficio de las horas y donde se celebraban las grandes festividades religiosas. En todas estas actividades la música, y en especial la música vocal, tenía un papel fundamental, aunque también se realizaban interpretaciones instrumentales (órgano) y teatrales (villancicos, autos sacramentales, etc.).

Esta comunicación describe el trabajo realizado para la creación y calibración del modelo virtual de la basílica. La planimetría del espacio se obtuvo mediante mediciones con escáner láser y, a partir de las nubes de puntos medidas, se levantó el modelo tridimensional utilizando el software SketchUp. Posteriormente, éste fue calibrado mediante el programa de simulación acústica *Odeon*®. Para comprobar la veracidad acústica del modelo se realizaron mediciones *in-situ* que fueron utilizadas para comprobar que los resultados de la simulación se corresponden con las mediciones. La basílica se conserva hoy en día en un estado prácticamente idéntico al original, por lo que el modelo creado representa fielmente el estado del recinto en siglos anteriores.

ABSTRACT

The Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial is a place of great importance in Spanish musical history. The most relevant enclosure of this architectural complex is the basilica, where the Hieronymite monks spent a minimum of eight hours a day while celebrating the liturgy of the hours and where major religious festivities were held. In all these

activities, music, and especially vocal music, played a fundamental role, although instrumental (organ) and theatrical (*villancicos*, auto sacramentals, etc.) interpretations were also performed.

This communication describes the work carried out for the creation and calibration of the virtual model of the basilica. The planimetry of the space was obtained by laser scanner measurements and, from the measured point clouds, the three-dimensional model was built using the software SketchUp. Subsequently, the model was calibrated using the acoustic simulation software *Odeon*®. To check the acoustic veracity of the model, *in-situ* measurements were taken. These measurements were used to verify that the simulation results correspond to the measurements. The basilica has been preserved in a state practically identical to the original, which means that the model created faithfully represents the state of the room in previous centuries.

Palabras Clave— reconstrucción virtual, modelo geométrico, caracterización acústica, acústica de templos

1. INTRODUCCIÓN

Los recintos históricos han sido foco de estudio de disciplinas como la arquitectura y la historia del arte desde hace décadas, pero sólo en los últimos treinta años esta investigación se ha transmitido también al mundo de la acústica [1–5]. Este interés ha surgido debido a la estrecha relación que existe entre las actividades sociales y artísticas que se llevaban a cabo en estos espacios y la acústica del recinto. Esta acústica se trata de una cualidad intangible y dependiente del espacio arquitectónico. El deterioro de estos espacios y, en muchos casos, la renovación de sus interiores para adaptarlos a los usos actuales, han producido la pérdida de un entorno

* **Autor de contacto:** m.larrosa@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

acústico de incalculable valor. La caracterización acústica y las herramientas de simulación permiten la conservación de estos entornos e, incluso, la posibilidad de estudiar las características acústicas de estados anteriores.

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial se trata de un entorno arquitectónico de gran relevancia en España debido a su historia, su arquitectura y al arte desarrollado por sus moradores. Desde su fundación hasta el siglo XIX estuvo habitado por una comunidad de 150 monjes jerónimos. La Orden Jerónima se trata de una orden exclusivamente española que daba una especial importancia al rezo de los oficios divinos [6]. Durante siglos, la música ha tenido un papel principal en la realización de la liturgia de las horas y la misa [7]. Este arte fue potenciado por Felipe II y sus sucesores, lo cual convirtió al Escorial uno de los focos más importantes para el desarrollo de la música religiosa en España [7]. El enclave esencial para este desarrollo artístico ha sido la basílica del monasterio, cuya acústica fue participe en la actividad musical durante casi 300 años.

La presente comunicación se centra en la creación y calibración del modelo geométrico de esta basílica. El modelo arquitectónico fue creado a partir de un conjunto de nubes de puntos medidas con un escáner láser 3D. Este modelo fue posteriormente trasladado al programa de simulación acústica *Odeon*® y se calibró mediante la utilización de respuestas al impulso. Estas respuestas fueron obtenidas previamente en una campaña de mediciones que se realizó en la basílica y otros entornos del monasterio [8]. La reconstrucción virtual del espacio sonoro de esta basílica permitirá recrear las interpretaciones musicales que se llevaron a cabo en su interior, al igual que estudiar la relación que esta música tiene con sus características acústicas.

Esta comunicación se ha dividido en cuatro apartados principales. En primer lugar, se hará una breve explicación de la historia de este monumento y de sus características arquitectónicas. Después, se explicará la metodología seguida en las mediciones *in-situ* y se presentarán los resultados obtenidos para los parámetros acústicos T_{20} y C_{80} . Posteriormente se explicará la realización de su modelo arquitectónico y, por último, se expondrán los pasos seguidos para la validación del modelo acústico.

2. DESCRIPCIÓN DE LA BASÍLICA

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial fue una empresa arquitectónica emprendida por el rey Felipe II. Su intención era construir un espacio que fuera a la vez monasterio en alabanza a dios, palacio donde él y sus sucesores pudieran residir, y centro de educación en filosofía y teología. Dentro de los cuatro muros que limitan el monasterio estos tres mundos tienen espacios bien diferenciados. La basílica es el lugar que, simultáneamente, los divide y los une, encontrándose en el centro de la construcción.



Figura 1. Interior de la basílica del Monasterio de San Lorenzo del Escorial.

La primera piedra de este templo fue asentada el 20 de agosto de 1563 y se dio por finalizada el 10 de agosto de 1586. La planta original del templo fue diseñada por el arquitecto italiano Pachote y la construcción fue dirigida por los arquitectos Juan Bautista de Toledo y Juan de Herrera [9].

El interior de la nave de la basílica corresponde con una cruz griega de 50 metros de lado que se extiende al este por el altar y al oeste por el coro. Estas extensiones crean la impresión de una planta de cruz latina. El interior de la basílica está dividido en tres naves: la principal, que presenta una altura de 30 metros, y las dos naves laterales, de 19 metros. En el cruce de la nave principal y el transepto se levanta una cúpula de 17 metros de diámetro, cuyo punto más alto se encuentra a 60 metros del pavimento. Alrededor de la basílica, exceptuando el lado este, se abren nueve capillas laterales. El coro, lugar donde la comunidad realizaba el oficio de las horas, está ubicado en el lado oeste de la nave. Se encuentra situado a una altura de 8 metros y presenta unas dimensiones de 26 x 15,5 metros. Debajo del coro, se sitúa el conocido como sotocoro, espacio separado de la basílica por un enrejado y desde donde la población podía asistir a las celebraciones que se realizaban en la basílica. El coro, la nave principal y el transepto se encuentran cerrados por un techo en forma de bóveda de cañón. El resto de la nave, las capillas laterales y el sotocoro presentan un techo abovedado.

La mayor parte del templo se encuentra construido en piedra berroqueña, que fue obtenida de una cantera cercana de la Sierra de Guadarrama [9]. Este material fue utilizado en las paredes de toda la basílica, en sus cuatro pilares centrales y en los arcos que dividen los espacios. El suelo del recinto está construido en mármol y las bóvedas del techo se terminaron en yeso, que durante el siglo XVII fue decorado con las pinturas que se conservan hoy en día. El altar y el retablo están principalmente construidos en mármol, aunque se pueden encontrar decoraciones y estatuas en jade y bronce.

Tabla 1. Valores promedio del T_{20} (s) medidos *in situ*.

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fuente y micrófono en nave	9,38	9,69	9,23	8,26	6,22	4,09	2,20
Fuente en nave y micrófono en coro	9,41	9,70	9,44	8,59	6,71	4,50	2,74
Fuente en coro y micrófono en nave	9,43	9,68	9,55	8,71	6,82	4,37	2,77
Fuente y micrófono en coro	8,33	8,62	8,32	7,44	5,59	3,16	1,76
Valor promedio de la sala	9,07	9,38	9,04	8,20	6,16	3,90	2,20

3. MEDICIONES *IN-SITU*

Se llevó a cabo una campaña de mediciones acústicas que permitió obtener los valores de los parámetros objetivos que posteriormente serían utilizados para la calibración del modelo virtual. Estos parámetros se obtuvieron a partir de la medición de la respuesta al impulso, que se realizó siguiendo la norma ISO 3382-1 [10] y las recomendaciones propuestas en [2,11].

Las mediciones se llevaron a cabo a lo largo de cinco lunes (único día que el monasterio no está abierto a visitas) de los meses de junio y julio de 2021. Se realizaron en horario de mañana y el tiempo total que se necesitó para terminarlas fue de 30 horas. Estas medidas fueron realizadas por los tres autores de esta comunicación.

El equipamiento utilizado estaba formado por una fuente dodecaédrica B&K 4292-L, un amplificador de potencia B&K 2716C, una tarjeta de sonido RME Fireface UFX y un micrófono DPA 4006A. Adicionalmente se utilizó un sonómetro B&K 2270 para medir el ruido de fondo y una estación meteorológica para registrar las condiciones ambientales en las que se desarrollaron las mediciones.

Las posiciones seleccionadas para fuentes y receptores se determinaron tras la revisión bibliográfica de los textos escritos por los cronistas del monasterio [9,12]. Se eligieron todas aquellas posiciones que han sido descritas en los testimonios y, además, se añadieron un conjunto de posiciones adicionales en la nave de la basílica para facilitar la calibración. Se utilizaron 18 posiciones de fuente y 27 de receptor, que se combinaron para obtener un total de 198 respuestas al impulso.

La basílica fue dividida en dos espacios para facilitar la realización de las mediciones: la nave y el coro. Se realizaron cuatro grupos de mediciones en función del espacio en el que se encontraban la fuente y el receptor.

El programa utilizado para la generación de la señal de emisión y para procesar la señal captada por el micrófono fue el software Dirac. La señal de emisión utilizada fue un barrido sinusoidal (20 – 20k Hz) de 21,8 s de duración. El

resultado final de cada posición se obtuvo mediante el promediado de tres barridos.

Los valores promedio obtenidos de los parámetros T_{20} y C_{80} para cada grupo de mediciones se presentan en las Tablas 1 y 2, así como el valor promedio de la sala.

4. MODELO ARQUITECTÓNICO

Las mediciones de las dimensiones del recinto se realizaron el último día de mediciones acústicas mediante la utilización de un escáner láser 3D. Se tomaron medidas en siete puntos de la basílica: uno en el altar, cuatro en la nave y dos en el coro. Las medidas del sotocoro fueron tomadas utilizando un medidor láser de mano.

Las nubes de puntos fueron utilizadas para obtener las dimensiones del recinto. A partir de ellas y de las medidas tomadas manualmente se realizó un modelo simplificado de la basílica. Este modelo fue realizado en el software de diseño SketchUp e imágenes de él pueden verse en la Figura 2.

En la creación del modelo fue necesario realizar dos simplificaciones. La primera de ellas fue la aproximación de las bóvedas, arcos y cúpula de la basílica a superficies planas, debido a la incapacidad de los programas de diseño de trabajar con superficies curvas. En segundo lugar, se simplificó la geometría del retablo de la basílica, de la sillería del coro y de los órganos. Estos objetos se encuentran altamente decorados y su recreación en detalle implicaría la creación de un gran número de caras que ralentizarían futuros procesos de cálculo. La solución optada ha sido reducir estos objetos a planos de mayor tamaño a los que luego se les adjudicará un coeficiente de *scattering* elevado para compensar la simplificación.

La creación del modelo 3D se realizó mediante el uso de capas, una para cada material de la basílica. La creación de estas capas diferenciadas facilitaría posteriormente la asignación de materiales en el modelo acústico.

Una vez finalizado el modelo geométrico simplificado de la basílica se posicionaron los puntos de

Tabla 2. Valores promedio del C_{80} (dB) medidos *in situ*.

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fuente y micrófono en nave	-5,8	-5,7	-5,5	-5,4	-4,2	-2,2	0,8
Fuente en nave y micrófono en coro	-15,5	-15,5	-15,5	-14,1	-12,6	-10,4	-4,8
Fuente en coro y micrófono en nave	-15,9	-14,0	-17,2	-15,7	-14,4	-11,3	-8,3
Fuente y micrófono en coro	-1,3	-1,8	-1,7	-1,3	-1,4	0,6	3,4
Valor promedio de la sala	-4,9	-5,2	-5,1	-4,8	-4,3	-2,3	0,7



Figura 2. Modelo arquitectónico de la basílica (izq.: vista exterior; centro: altar; dcha.: coro).

fuelle y de receptor utilizados en las mediciones a partir de una extensión de *Odeon*® disponible para SketchUp. Una vez terminado, se exportaron el modelo en formato .Par y las posiciones de fuente y micrófono en formato .SouRecScript.

5. MODELO GEOMÉTRICO Y CALIBRACIÓN

Los dos ficheros exportados de SketchUp fueron cargados en el software de simulación acústica *Odeon*® y, en primer lugar, se comprobó que el modelo estuviera correctamente cerrado y que no hubieran superficies solapadas.

Gracias a las visitas realizadas a la basílica y a las descripciones disponibles en numerosos libros [9,12] es fácil conocer los materiales que la constituyen. El material más común es la piedra berroqueña, seguida por el yeso y el mármol. En menor cantidad, existen otros materiales como cristal, bronce y madera. Los primeros coeficientes de absorción adjudicados a estos materiales fueron obtenidos de bases de datos y de otros trabajos de recreación de recintos históricos [13,14]. Tras la adjudicación de los materiales se especificó en el *set up* de simulación las condiciones ambientales que había durante las mediciones, que se corresponden con una temperatura de 12,6 °C y un 25% de humedad relativa.

La calibración del modelo se realizó utilizando como guía las respuestas al impulso medidas en la basílica. No se utilizaron todas las respuestas medidas debido a que algunas de las combinaciones fuente y micrófono utilizadas hacen referencia a situaciones históricas muy concretas y no representan adecuadamente la transmisión del sonido en todo el espacio.

El proceso de calibración se realizó de forma escalonada. En primer lugar, se utilizaron las posiciones de fuentes y receptor situadas en la nave para calibrar este espacio, que es el que más volumen ocupa. Seguidamente, se verificó la similitud de los resultados obtenidos en la simulación con los de las respuestas al impulso medidas en el altar. Por último, se calibró el coro, que debido a su posición y decoración actúa como una “sala dentro de una sala”.

Los resultados de las simulaciones se compararon con los parámetros objetivos obtenidos de las mediciones acústicas. Se intentó en todo momento que la diferencia entre el valor simulado y el medido fuera inferior a 1 JND. El primer parámetro que se calibra es el T_{20} y, una vez ajustado,

se comprueba la adecuación del EDT, T_s y C_{80} . En cada iteración de la calibración, los coeficientes de absorción y *scattering* de los materiales se modifican para ajustar los resultados de la simulación a las mediciones.

El primer intento de ajuste de la basílica no se consideró adecuado debido a los grandes cambios que fue necesario realizar en los materiales para conseguir valores de T_{20} semejantes a los medidos en la sala. La basílica, como se ha podido ver en los resultados de las mediciones, se trata de un recinto altamente reverberante. El principal problema de esta primera simulación acústica es que la sala era mucho menos reverberante a causa de la elevada absorción del aire. Para poder ajustar los valores del T_{20} fue necesario reducir considerablemente los coeficientes de absorción de materiales como la piedra, el yeso o el mármol. Con estas modificaciones fue posible ajustar el margen de bajas y medias frecuencias, pero independientemente de los intentos realizados, fue imposible ajustar las bandas de 2, 4 y 8 kHz. Una modificación tan elevada de los materiales no contentó a los autores de esta comunicación debido a que los coeficientes de absorción iniciales de estos materiales fueron utilizados con éxito en las simulaciones de otros recintos del Monasterio de San Lorenzo.

La mayor fuente de absorción en este primer modelo acústico es el aire. Los programas de simulación acústica consideran que la temperatura y la humedad relativa en todo el recinto son homogéneas, lo cual no se cumple en volúmenes tan grandes como el de la basílica. En estos espacios, la temperatura y la humedad varían en función de la zona, la altura e, incluso, existen corrientes de aire que afectan a la propagación del sonido. Se considera que esta simplificación ha tenido un gran efecto sobre los resultados de las simulaciones. Además, tras buscar bibliografía referente al efecto que los cambios de humedad relativa y temperatura tienen sobre la absorción del aire, se ha podido comprobar que para la combinación de condiciones ambientales en las que se realizaron las mediciones, las bandas de 2, 4 y 8 kHz se encuentran muy cerca de un máximo de absorción [15].

Para solucionar el problema de la absorción del aire se decidieron modificar las condiciones ambientales de la simulación. Tras la realización de varias pruebas se decidió fijar la temperatura de la simulación en 16,5 °C y la humedad relativa en un 40%. Con estas nuevas condiciones, se volvió

Tabla 3. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en el modelo acústico según la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente absorción								Scattering
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Alfombra	0,060	0,060	0,120	0,200	0,280	0,390	0,530	0,530	0,020
Bronce, jade y metales	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,050
Cristal	0,140	0,100	0,040	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020
Madera	0,210	0,210	0,220	0,200	0,170	0,110	0,100	0,100	0,050
Madera sillería	0,210	0,112	0,084	0,084	0,084	0,046	0,030	0,030	0,400
Mármol altar	0,040	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,080	0,080	0,200
Mármol suelo	0,010	0,011	0,013	0,018	0,021	0,024	0,026	0,016	0,02
Órgano	0,530	0,530	0,500	0,570	0,620	0,600	0,600	0,300	0,350
Piedra berroqueña	0,044	0,044	0,042	0,032	0,032	0,032	0,016	0,014	0,060
Pinturas	0,027	0,027	0,043	0,093	0,170	0,243	0,410	0,410	0,050
Ventana	0,140	0,100	0,040	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,050
Yeso	0,060	0,040	0,030	0,030	0,021	0,015	0,015	0,015	0,040

a realizar el mismo método de calibrado, comenzando con la nave de la basílica, comprobando después el altar, y finalizando en el coro.

Se volvió a intentar que la diferencia entre los valores medidos y los simulados fuera inferior a 1 JND, aunque esto no fue posible para todas las combinaciones fuente y micrófono, aceptándose de forma general que la diferencia entre ambos valores fuera inferior a 3 JNDs. En este caso únicamente fue necesario modificar los coeficientes de absorción del yeso que conforma los techos del recinto y la sillería del coro. Los valores de los coeficientes de los materiales ajustados para la calibración del modelo se muestran en la Tabla 3.

La comparativa de los valores medidos *in-situ* y los valores simulados para el T_{20} se muestran en las Figuras 3 y 4. Se puede observar que, tanto en las posiciones de la nave como en las del coro, las frecuencias en las que peor ajuste se ha podido realizar es en las bandas de 4 y 8 kHz. Se tratan de las dos únicas bandas donde se obtienen diferencias superiores a 3 JND. Esta diferencia se debe, una vez más, a la absorción del aire.

En ambas posiciones, las simulaciones realizadas para las bandas de 125 a 1000 Hz presentan una diferencia inferior a 1 JND con los resultados de las mediciones. Las bandas de 63 Hz y 2 kHz presentan diferencias de menos de 2 JND para el caso de la nave y de 3 JND para el caso del coro. Las diferencias para las bandas de 4 y 8 kHz para las dos situaciones son superiores en todos los casos a 6 JND.

A pesar de la falta de ajuste en estas dos bandas, no se consideró adecuado realizar mayores modificaciones de los coeficientes de absorción de los materiales o aumentar las condiciones ambientales en las que se realizaba la simulación. Por lo tanto, una vez alcanzado estos ajustes, se consideró que el T_{20} del modelo de la basílica había sido correctamente ajustado.

El ajuste de los parámetros del EDT, T_s y C_{80} también se ha considerado como válido, siendo las diferencias promedio de todas las bandas de frecuencia inferiores a 4 JND para ambas posiciones. En el caso del T_s y

del C_{80} , las mayores diferencias encontradas entre valores medidos y simulados es para las bandas de 63 y 125 Hz.

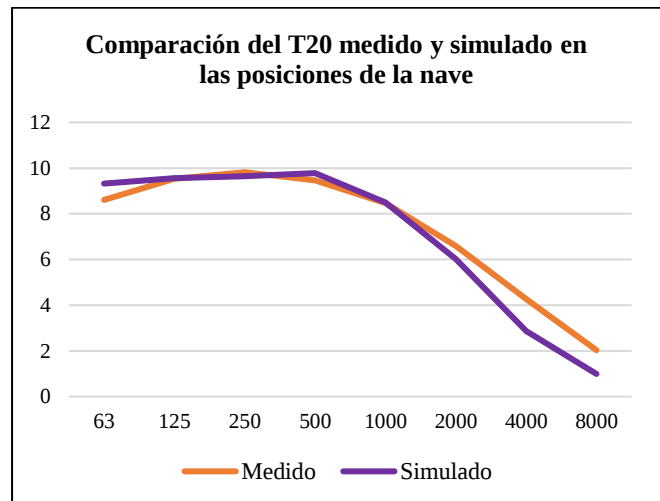


Figura 3. Comparativa medido-simulado del T_{20} en la nave.

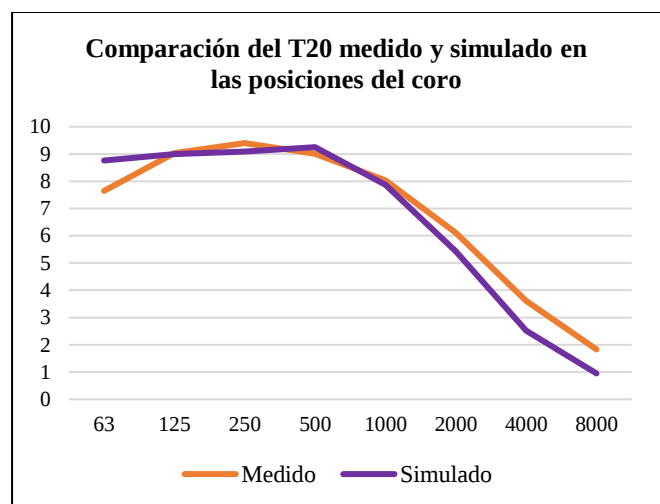


Figura 4. Comparativa medido-simulado del T_{20} en el coro.

6. CONCLUSIONES

La presente comunicación muestra el esfuerzo realizado para crear un modelo acústico representativo del campo sonoro existente en la basílica del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial. El modelo fue validado por zonas y se utilizaron como referencia respuestas al impulso medidas *in-situ*.

El principal problema afrontado durante la calibración fue la absorción del aire. Debido al gran volumen de la basílica esta absorción era muy elevada, especialmente para el margen de frecuencias de 2 a 8 kHz. Para poder ajustar el modelo fue necesario aumentar levemente tanto la temperatura como la humedad relativa. Tras este cambio fue posible ajustar el modelo con sólo la modificación de las características de absorción de dos materiales: el yeso del techo y la madera de la sillería del coro. Se consiguieron diferencias inferiores a 2 JND para las posiciones de la nave e inferiores a 3 JND para las posiciones del coro en las bandas de 63 a 2k Hz. La absorción del aire no permitió ajustar los resultados de las simulaciones para 4 y 8 kHz.

Este modelo será utilizado en futuras investigaciones para la auralización de interpretaciones musicales que tuvieron lugar en la basílica y para estudiar la realización existente entre sus parámetros acústicos y las características musicales de las piezas que fueron compuestas para este entorno.

7. AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer un especial agradecimiento a Patrimonio Nacional y a la Comunidad Agustina de San Lorenzo por permitimos acceder a la basílica y por la atención y facilidades que se nos han prestado.

8. REFERENCIAS

- [1] Almagro-Pastor JA, García-Quesada R, Vida-Manzano J, Martínez-Irureta FJ, Ramos-Ridao ÁF. The Acoustics of the Palace of Charles V as a Cultural Heritage Concert Hall. *Acoustics*, vol. 4, Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2022, p. 800–21.
- [2] Álvarez-Morales L, Zamarreño T, Girón S, Galindo M. A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Build Environ* 2014;72:102–15.
- [3] Delgado García EM, Delgado García A, Pedrero González A, Díaz Sanchidrián C. Estudio acústico de la cripta del Hospital de San Juan Bautista de Toledo 2017.
- [4] Álvarez-Morales L, Lopez M, Álvarez-Corbacho Á. Cathedral Acoustics: Bristol Cathedral as a Case Study. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 259, Institute of Noise Control Engineering; 2019, p. 6457–68.
- [5] Gómez Alfageme JJ, Nogueira López P, Martellotta F, Blanco Martín E, Ciani F, Gonzalo Galán J, et al. Acoustic characterization of Cathedral of Santiago de Compostela. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 259, Institute of Noise Control Engineering; 2019, p. 7925–36.
- [6] Sierra Pérez J. La realeza en la liturgia: Monasterio del Escorial (Siglo XVI, Felipe II). In: Prensa L, Calahorra P, editors. *XIII y XIV Jornadas de Canto Gregoriano. XIII Música en la hispania Romana, Visigoda y Medieval. XIV Los monasterios, senderos de vida*, Zaragoza: Institución Fernando el Católico; 2010, p. 125–55.
- [7] Hernández González L. Música y culto divino en el Real Monasterio de El Escorial (1563-1837). San Lorenzo de El Escorial: Ediciones Ecurialenses ; 1993.
- [8] Larrosa Navarro M, Pedrero González A, De la Prida Caballero D. Caracterización acústica de los espacios sonoros del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial. *Tecniacústica*, Elche: 2022.
- [9] Fray José de Sigüenza. La fundación del Monasterio de El Escorial. Madrid: Turner Libros, S.A.; 1988.
- [10] International Organization for Standardization. Acoustics — Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters (ISO 3382:1997). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1997.
- [11] Martellotta F, Cirillo E, Carbonari A, Ricciardi P. Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics* 2009;70:378–88.
- [12] Quevedo J. Historia del Real Monasterio de San Lorenzo, llamado comunmente del Escorial, desde su origen y fundación hasta fin del año 1848 y descripción de las bellezas artísticas y literarias que contiene. Madrid: Establecimiento tipográfico de Mellado; 1849.
- [13] Pedrero González A. Restauración virtual del patrimonio sonoro. Aplicación al antiguo rito hispánico. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [14] Martellotta F, Castiglione ML. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. *Forum Acusticum* 2011, 2011.
- [15] Harris CM. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *J Acoust Soc Am* 1966;40:148–59.