



14 CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON UNDERWATER ACOUSTICS
APPLICATIONS
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE BUILDING
ACOUSTICS

ESTUDIO ACÚSTICO DE LA CRIPTA DEL HOSPITAL DE SAN JUAN BAUTISTA DE TOLEDO.

PACS no. 43.55.Ka, 43.55.Gx

Delgado García, Elda María¹; Delgado García, Antonio²; Pedrero González, Antonio³; Díaz Sanchidrián, César³

1. E-mail: eldamadle@gmail.com

2. <http://orcid.org/0000-0001-6343-2853>

E-mail: antondelgar@hotmail.com

3. Grupo de investigación en Acústica Arquitectónica, ETS de Arquitectura
Universidad Politécnica de Madrid

Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

Tel: +34 913 364 249

Fax: +34 913 366 554

E-mail: arquilav.arquitectura@upm.es

Palabras Clave: cripta, acústica virtual, patrimonio inmaterial, galería de susurros.

ABSTRACT

The crypt of the Hospital of San Juan Bautista in Toledo, Spain, is part of a Renaissance architectural complex with a great patrimonial value. It has a Greek cross floor plan and is covered by four barrel vaults and a central hemispherical vault. Its geometry produces various acoustical effects like echoes, sound focalization, and whisper in the galleries.

In the present study, the acoustic parameters of this unique space have been measured. And, two simulation models have been generated: the first, based on the current crypt's geometry and, the second, using the geometry of this space in the XVI century, eliminating changes carried out afterward, with the purpose of restoring the original acoustic characteristics of the crypt.

RESUMEN

La cripta del Hospital de San Juan Bautista de Toledo es un espacio integrado en un complejo arquitectónico renacentista de gran valor patrimonial. Presenta planta de cruz griega cerrada por cuatro bóvedas de cañón y una central de vuelta de horno. Su geometría hace que se produzcan en su interior ecos, focalizaciones y susurro de galerías.

En este estudio se han medido parámetros acústicos y se han generado dos modelos de simulación, uno según la geometría actual y un segundo en el que se han eliminado las modificaciones realizadas con el fin de restaurar la acústica original del siglo XVI.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el estudio del comportamiento sonoro de los recintos patrimoniales se está abriendo camino en la investigación, existiendo un creciente interés en la comunidad científica hacia la generación de conocimiento y difusión de la acústica de estos espacios. Entre las finalidades se encuentra revalorizar y concienciar de cómo se han de enfocar las futuras intervenciones en estos espacios, de modo que, se conserve el campo sonoro específico de cada recinto, ya que este es una parte importante de la memoria colectiva.

En los recintos arquitectónicos, la percepción sonora depende no sólo del mensaje transmitido, sino también, de cómo el espacio lo moldea. La geometría del espacio, los materiales y sus

acabados, los elementos decorativos y los propios asistentes afectan en las ondas sonoras generando un entorno acústico único. En cada periodo artístico diversas construcciones arquitectónicas se han realizado con un claro diseño para potencializar los sonidos y conseguir el efecto deseado; estos son, por ejemplo, los recintos de culto donde se pretendía crear una percepción sonora específica que imprimiera al mensaje cierto carácter espiritual. En Toledo, encontramos un espacio de gran singularidad geométrica y sonora, este es la cripta ubicada bajo la Iglesia del Hospital de San Juan Bautista, la cual presenta una acústica tan peculiar que ha suscitado siempre la curiosidad de todo el que se adentra en ella, ya que son perceptibles múltiples efectos sonoros, siendo tal vez el más característico el susurro de galerías.

Para caracterizar acústicamente este espacio se han tomado medidas in situ de los parámetros acústicos y se han generado modelos geométricos 3D simplificados. A partir de estos se han creado modelos acústicos virtuales representativos del mismo. En el caso de la cripta, esta tecnología ha permitido aproximarse a una reconstrucción virtual de la sonoridad del espacio en la que se creó su arquitectura en el siglo XVI; así mismo, ha permitido generar respuestas impulsivas representativas en varios puntos de la misma, posibilitando dar a conocer, mediante auralizaciones, la acústica de este espacio patrimonial a día de hoy no visitable.

La cripta: entorno y arquitectura

La cripta se ubica bajo la Iglesia del Hospital de San Juan Bautista de Toledo, u Hospital de Tavera, siendo este considerado el primer edificio totalmente clásico de la meseta central castellana en la época del Renacimiento [1] y una de las obras cumbres de la arquitectura del renacimiento español. Las trazas y el diseño en planta del Hospital Tavera toman como modelo la gran casa privada romana de doble patio descrita por Vitrubio [2], amplificada con los avances técnicos y materiales de esa época. Se mandó construir por el cardenal arzobispo Juan Pardo y Tavera con una doble finalidad, la obra respondería a la necesidad de un nuevo hospital que resolviera la problemática del aumento de la población como consecuencia del establecimiento en Toledo de la corte Imperial de Carlos V, que, en diversos momentos de su itinerancia, motivaba la llegada de gran cantidad de personas provenientes tanto de España como de Europa y, por otra parte, para albergar el Panteón de su fundador.



Fig. 1. Vista aérea del Hospital e interior de la Iglesia [3].

La geometría de la cripta viene marcada por su planta de cruz griega, cuyo centro es un círculo perfecto, este espacio queda cubierto por una bóveda de media esfera o “media naranja”, exenta de decoración y construida mediante aproximación de hiladas de granito. La cúpula central posee un radio de 6,9 m estando soportada sobre un estrecho tambor de tan sólo 0,36 m. Esto junto a una imperceptible pendiente del solado de 8 cm hacia el punto central, donde se encuentra el desagüe o lagar, hace que la altura final de la cúpula en su eje sea de 7,34 m.

En su estructura encajan los brazos de la cruz cubiertos a su vez por bóvedas de cañón, con una anchura de 7,9 m y de altura la mitad. Existe una perfecta proporcionalidad siendo el tamaño de las capillas en altura la mitad en cuanto a la bóveda central, y de una profundidad tal que hay el mismo volumen bajo las bóvedas de cañón de los cuatro brazos que el ubicado bajo la bóveda semiesférica central, en total 653,81 m³. Como distorsión de la cruz griega, la crujía del eje principal abre un hueco añadido para la mesa de altar, elevado con respecto al resto del espacio, según es costumbre de los templos cristianos.

Respecto a los materiales, las bóvedas y paredes son de piedra berroqueña, el enlosado y los elementos funerarios tales como pináculos y urnas son de mármol y de forja las rejas que cubren los respiraderos y las ubicadas en los accesos inmediatos al espacio subterráneo. El círculo bajo la bóveda central está compuesto por 8 circunferencias concéntricas de mármol blanco, destacando la segunda más próxima a la superficie abovedada al ser esta de mármol negro y sobre la que se ubican 4 esbeltos pináculos funerarios del mismo material pétreo. Este cambio del enlosado marca el espacio de la galería de susurros.

No obstante, pese al acostumbramiento de la época de respetar la geometría perfecta, nos encontramos varias rarezas arquitectónicas, la más significativa es el conducto que desemboca en la sacristía por medio de las escaleras que unen iglesia y cripta. En relación a esto, existe la posibilidad de que ya se conocieran en esta época las construcciones que un siglo después describe Kircher [4] para a través de conductos escuchar las conversaciones entre salas.



Fig. 2. Interior de la cripta.

METODOLOGÍA

En este estudio se ha realizado la investigación archivística necesaria para conocer los posibles usos y modificaciones de la cripta, permitiendo con ello seleccionar las distintas posiciones de emisores y receptores. Se han medido in situ los parámetros acústicos para la caracterización global del espacio y de la galería de susurros. Con las respuestas impulsivas tomadas in situ se ha calibrado un modelo de simulación que responde al comportamiento actual del espacio y un modelo que simula el espacio en el siglo XVI.

Medidas in situ

Las medidas realizadas se han enfocado desde el punto de vista de la caracterización y funcionalidad del espacio, estudiando la acústica que se produciría durante el rito y donde el mensaje transmitido sería inteligible, así como, los fenómenos sonoros acusados que distorsionan el mensaje: reverberación, ecos y focalizaciones y, por otra parte, para caracterizar la acústica en la galería de susurros.

Las mediciones se han realizado siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 3382-1 [5]. En el área de la galería de susurros y dadas las características especiales de lo que se deseaba medir, no se ha podido aplicar con rigor esta normativa debido a que la galería está muy próxima a las superficies tanto de la bóveda central como de los pináculos funerarios, ubicando fuente y receptores en el centro entre superficies, es decir, a 40 cm de ambas.

La toma de medidas *in situ* se realizó en periodo diurno, estableciendo una altura, a nivel de suelo, para las fuentes y los receptores sonoros, de 1,5 y 1,2 metros, respectivamente. La temperatura fue de 12,5 °C y la humedad relativa del 32 %, constante durante el proceso de registro de las señales.

Para la primera tipología de medidas se han establecido 2 posiciones de fuente, respondiendo a dos inquietudes: caracterizar el campo sonoro en todo el recinto y determinar cuántas personas podrían estar presentes durante el rito y dónde deberían ubicarse para entender el mensaje del oficiante. Debido a que el rito en el siglo XVI, que según las constituciones del hospital se daba en las distintas capillas [6], era el rito privado, se ha establecido una primera posición de fuente F1 al pie del altar, simulando al que sería la persona oficiante (fig. 3), y 12 posiciones de receptores, ubicando la primera de ellas cercana al altar, posición que podría corresponderse con la del acólito, siempre presente durante la realización de los ritos. La otra posición de fuente F2 se ha ubicado bajo el eje de la bóveda, situada sobre el largar, ya que la concentración sonora que la bóveda produce sobre él lo convierte en uno de los puntos sensorialmente más característicos de este espacio.

La sala se excitó mediante barridos exponenciales de señales sinusoidales, con una duración de 10,9 segundos, registrando las respuestas monoaurales. Los equipos empleados para la excitación y registro de los datos fueron: PC con el software de adquisición de datos Dirac, tarjeta de audio externa, amplificador de potencia, fuente sonora dodecaédrica y micrófono omnidireccional.

La segunda tipología de medidas está encaminada al estudio de la inteligibilidad al emitir desde la galería de susurros. Se ha seleccionado una posición de fuente que simularía al emisor y 13 posiciones de micrófono, además, se ha comprobado la reciprocidad de las medidas en puntos simétricos. Se ha empleado la fuente sonora directiva ECHO Speech Sound Type 4720 Bruel & Kjaer, específica para la medida de la inteligibilidad de la voz y que proporciona estímulos intermitentes MLS seguidos de periodos de silencio de igual longitud. La fuente sonora se ha ubicado en F4 (fig. 3) entre uno de los pináculos y la superficie abovedada, orientado hacia esta. Se han realizado registros de la respuesta al impulso baural mediante el uso de un simulador de cabeza y torso 4100D Bruel & Kjaer orientado hacia la superficie abovedada y situada a 40 cm de la misma.

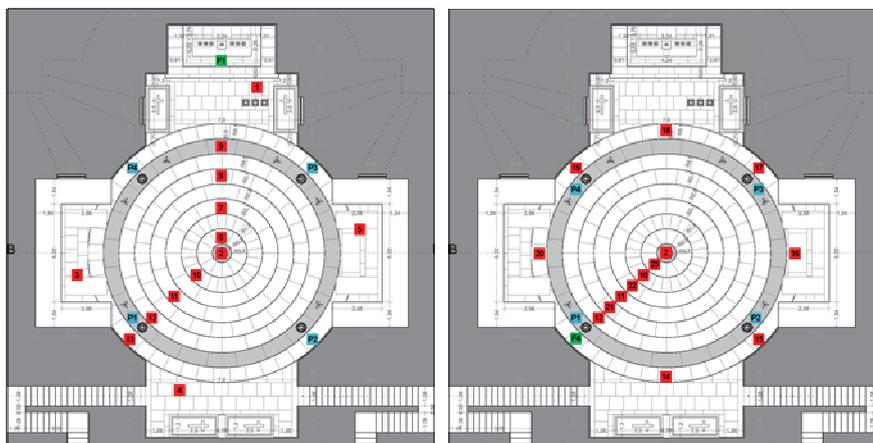


Fig. 3. Distribución de los receptores al emitir desde la posición del oficiante (izquierda) y en la galería de susurros (derecha).

Modelos virtuales

Para generar modelos acústicos virtuales representativos del comportamiento sonoro de este espacio se ha creado un modelo 3D en SketchUp, depurando su geometría y exportándolo al simulador acústico Odeon Room Acoustic. En el levantamiento del modelo digital se ha tenido en cuenta únicamente el primer tramo de las escaleras gemelas que descienden a la cripta. Las medidas geométricas se han extraído del modelo digital generado mediante tecnología escáner laser 3D con una resolución de ± 3 cm [7].

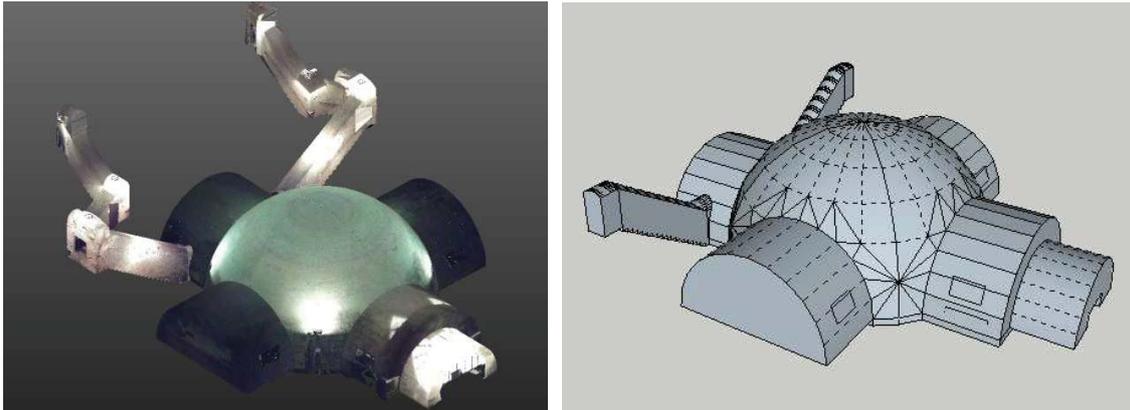


Fig. 4. Nube de puntos realizada con tecnología escáner laser 3D [7] (izquierda) y Modelo tridimensional de la cripta creado en SketchUp (derecha).

Con los valores obtenidos en las mediciones in situ se ha calibrado el modelo de simulación realizando el ajuste de las características acústicas de los materiales, en cuanto a absorción y dispersión (*scattering*), de forma que las diferencias entre los valores medidos y simulados sean inferiores a los valores de JND (*Just Noticeable Difference*) relativos a los parámetros más relevantes para la función litúrgica: Tiempo de Caída Inicial (EDT), Tiempo de Reverberación (T_{30}), Claridad de la Voz (C_{50}) y de la Música (C_{80}).

El total de las superficies ocupan un área de $915,73 \text{ m}^2$, donde el 64,6 % corresponde a piedra berroqueña y el 34,6 % a mármol, siendo inferior a un 1 % lo que ocupan el resto de los materiales: yeso, cemento y metal. Las simulaciones, al igual que las medidas, se han realizado con la sala vacía. En la tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción y dispersión de los dos materiales ajustados para la calibración del modelo.

Material	Coeficiente de absorción en bandas de octava (Hz)							Coeficiente de dispersión
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Piedra berroqueña	0.044	0.042	0.032	0.032	0.032	0.016	0.014	0.06
Mármol	0.016	0.016	0.018	0.018	0.016	0.016	0.016	0.05 ¹
Yeso	0.110	0.130	0.050	0.030	0.020	0.030	0.030	0.05
Cemento	0.010	0.010	0.015	0.020	0.020	0.020	0.020	0.05

Tabla 1. Coeficientes de absorción y dispersión.

¹Corresponde al coeficiente dado para el mármol del enlosado del suelo, variando para los elementos en función del tamaño de sus irregularidades: rodapiés 0,2; urnas funerarias 0,08; pináculos 0,01; altar 0,03; lápida 0,05.

La cripta presenta altos tiempos de reverberación y potentes focalizaciones sonoras producidas por el efecto de las bóvedas y los materiales, percibiéndose de manera muy notable bajo el eje de la bóveda central al emitir el sonido desde el mismo. La geometría y la presencia de superficies paralelas hacen que en su interior sean frecuentes y fácilmente perceptibles ecos.

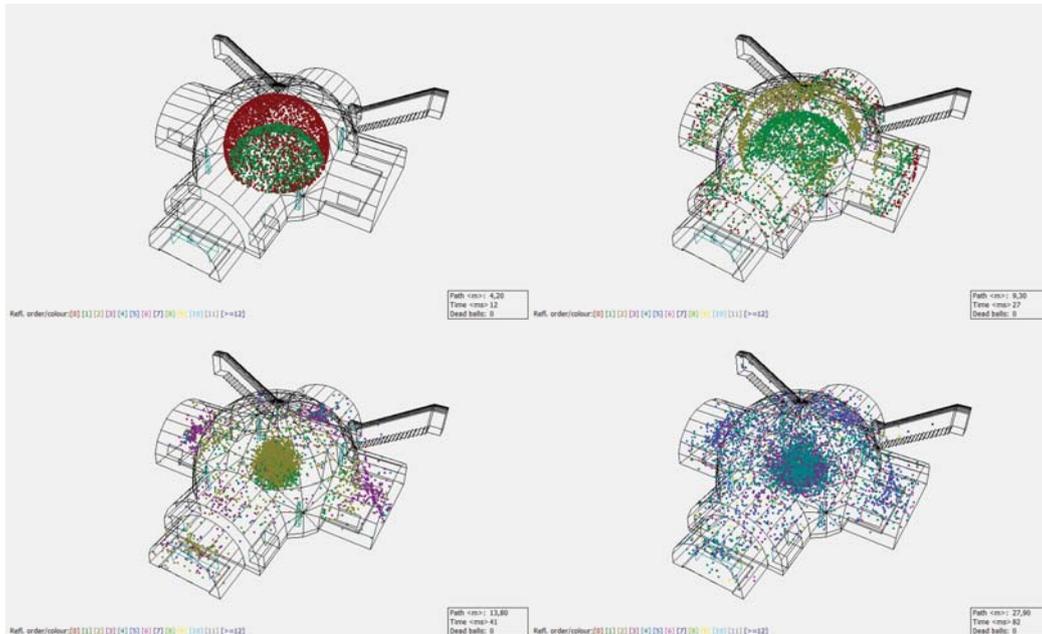
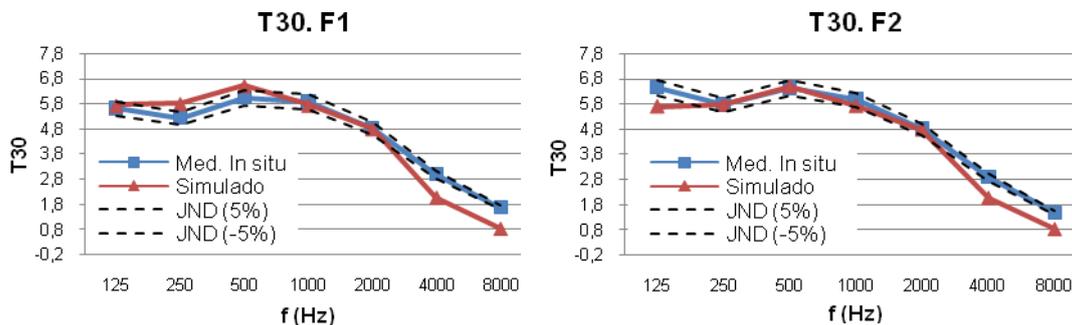


Fig. 5. Propagación del sonido al emitir desde F2.

La peculiaridad del espacio produce que, en puntos muy próximos, 80 cm, se hayan registrado *in situ* grandes variaciones en los parámetros sonoros, esto ha llevado a ajustar el modelo de una forma global, considerando válida la calibración cuando en la mayoría de los puntos y para las dos posiciones de fuente sonora, F1 y F2, las diferencias entre los valores medidos y simulados eran inferiores al JND a medias frecuencias. Sin embargo, el EDT es superior al JND en los puntos situados en el eje del altar cuando la fuente se ubica en F1 y F2, siendo el ajuste en esta última más preciso.



Respecto al C_{50} y C_{80} , claridad de la voz y de la música respectivamente, se ha conseguido un ajuste inferior al JND en la mayoría de los puntos, presentando mayor problema los más próximos al centro de la sala y el punto ubicado entre el pináculo funerario y la bóveda.

Una vez calibrado el modelo se han eliminado las mínimas modificaciones que, hipotéticamente, se habían introducido en la cripta desde su construcción, con el fin de aproximarse, mediante auralizaciones, a una recuperación virtual de la acústica primitiva del espacio en el siglo XVI. No obstante, el modelo de simulación no es preciso a la hora de representar el comportamiento acústico en el área de la galería de susurros cuando el orante y el oyente se encuentran en distintas posiciones de ella.

VALORACIÓN

El STI (*Speech Transmission Index*), es un indicativo de la inteligibilidad del habla dentro de un recinto. Permite analizar el espacio desde el punto de vista de su funcionalidad; mediante un análisis de la percepción sonora durante la realización de un rito y en la galería de susurros.

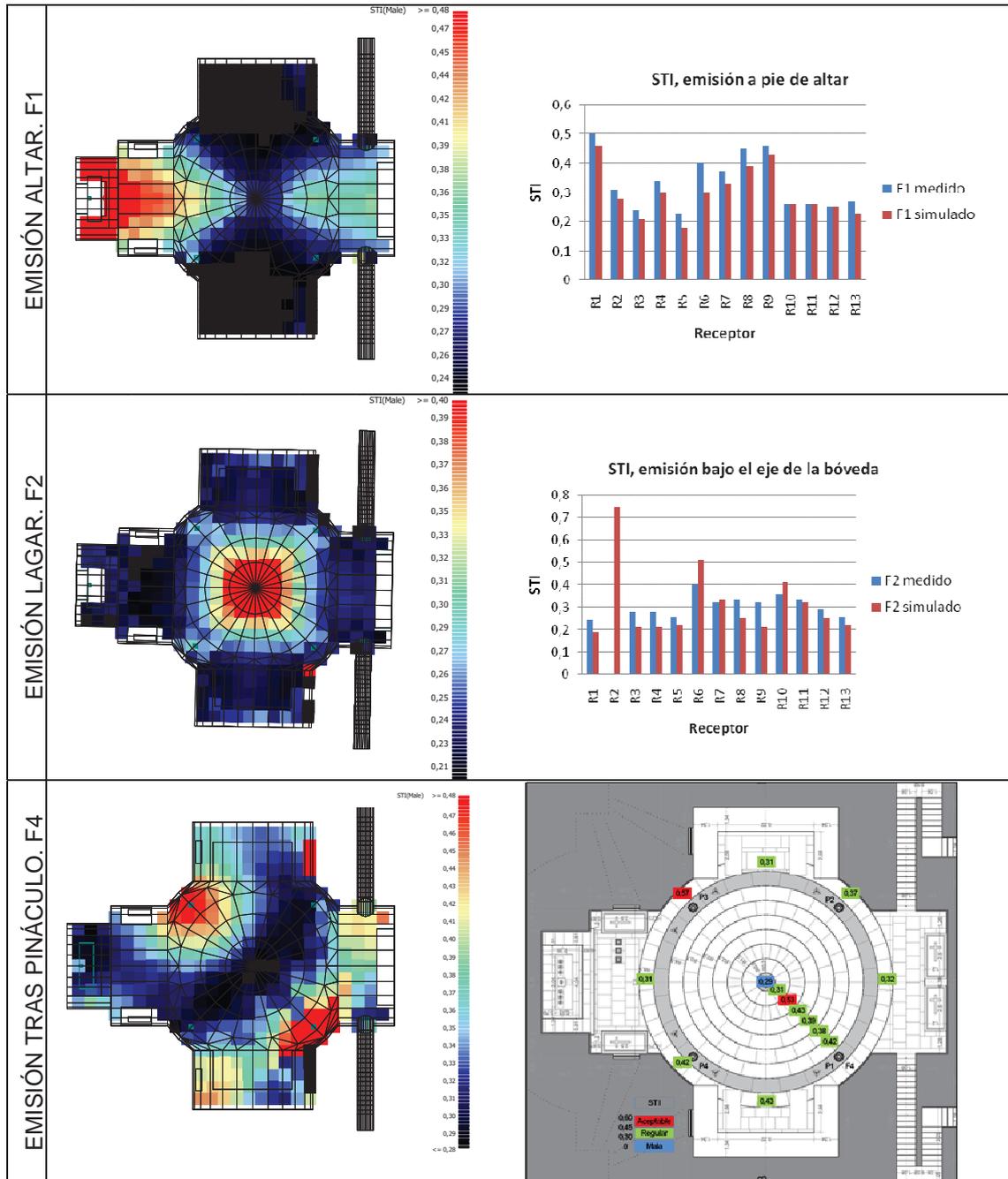


Fig. 6. Comparación STI medidos y simulados.

CONCLUSIONES

La valoración acústica realizada ha arrojado información del rito que se podría dar en este espacio. Los valores obtenidos demostraron que la cripta cumplía perfectamente la finalidad para la que se construyó, puesto que en el siglo XVI el rito que se oficiaba para las misas pagadas por el alma de los difuntos era el rito privado; por tanto, situándose el oficiante en el altar y el acólito muy próximo a él podrían comunicarse sin ningún inconveniente. La geometría de la cripta favorece a través de sus bóvedas la transmisión de las altas frecuencias y por consiguiente de los susurros, generándose el efecto susurro de galerías en el área existente entre la circunferencia de mármol negro y la superficie circular abovedada, efecto que es, *grosso modo*, cuantificable mediante medidas *in situ* pero que, sin embargo, no queda completamente reflejado en los modelos de simulación generados.

Los modelos de simulación han respondido parcialmente al comportamiento de la galería de susurros, ya que en ellos toda la transmisión se produce a través de la bóveda y únicamente hacia el punto opuesto. No obstante, aunque este punto es el más característico, no es el único que recibe el sonido en la galería. Los datos de las medidas realizadas han arrojado que el efecto del fenómeno sonoro es mayor en el punto diametralmente opuesto a la emisión, pero, además, detrás de los otros pináculos también se percibe, aunque con menor nitidez.

A través de las medidas de los parámetros sonoros realizadas *in situ* y de los modelos de simulación, ha sido posible valorar la acústica del espacio en el siglo XVI, permitiendo obtener las características sonoras de este recinto patrimonial y mostrarlas, mediante auralizaciones, de una manera intuitiva y atractiva para su divulgación.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Casa Ducal Medinaceli por brindarnos el acceso para el estudio acústico y archivístico de este magnífico lugar.

REFERENCIAS

- [1] Gómez, M., Las águilas del renacimiento español: Bartolomé Ordóñez, Diego Siloé, Pedro Machuca, Alonso Berruguete: 1571-1588, Bilbao, 1983 (reed).
- [2] Marías, F., El Hospital Tavera de Toledo, Fundación Casa Ducal Medinaceli, Sevilla, 2007.
- [3] Fundación Casa Ducal Medinaceli.
- [4] Kircher, A., Phonurgia Nova sive Conjugium mechanico-physicum, artis & naturae, paranympa phonosophia., Campidonae (Kempten), 1673.
- [5] UNE-EN ISO 3382-1:2010: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [6] Archivo del Hospital Tavera, Constitución del Hospital de San Juan Bautista, Toledo, 1601.
- [7] Manso, I. Farjas, M., Estudio acústico virtual de la cripta del Hospital Tavera (Toledo): implementación de tecnologías escáner láser 3D y análisis espacial del modelo, Madrid, 2017.