



Lám. 104. Bóvedas de crucería y plementerías de la nave lateral de la iglesia abacial de Santa María de Piedra, s. XIII.

LA RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL SONIDO PRIMITIVO DEL MONASTERIO DE PIEDRA: ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

DR. ANTONIO PEDRERO GONZÁLEZ

Universidad Politécnica de Madrid

antonio.pedrero@upm.es

D. LEO MARANDET

leo.marandet@gmail.com

DR. LUIS IGLESIAS MARTÍNEZ

Universidad Politécnica de Madrid

luis.iglesias@upm.es

D. DANIEL DE LA PRIDA CABALLERO

danieldelaprida@gmail.com

Resumen: Las tecnologías de realidad acústica virtual permiten reconstruir el sonido de los espacios sonoros históricos tal y como eran en su estado primitivo. La creación de los modelos acústicos que permiten esta reconstrucción se realiza, normalmente, en dos fases. En la primera fase se elabora un modelo acústico que representa la situación actual del edificio. Este modelo virtual de la situación actual se puede validar comparando el comportamiento acústico del modelo con el del propio edificio, obtenido mediante mediciones acústicas *in situ*. Una vez que se dispone de un modelo validado de la situación actual, se puede acometer la segunda fase en la que, basándose en la documentación histórica y arqueológica disponible, se modifica el modelo obtenido para que este represente las condiciones que tenía el edificio en el pasado. De esta manera, utilizando una técnica denominada auralización, se puede restaurar virtualmente el sonido original de los edificios históricos. El trabajo que aquí se presenta corresponde a la creación de los modelos acústicos virtuales del estado actual de dos de los espacios del Monasterio de Piedra: la sala capitular y el refectorio. Para ello se han generado sendos modelos geométricos, utilizando las últimas tecnologías de representación planimétrica tridimensional. Los modelos geométricos han servido como base para la creación de los correspondientes modelos acústicos. Por otra parte, se ha realizado una campaña de mediciones acústicas *in situ* que, además de servir para evaluar las características acústicas de los edificios, se han utilizado para validar los modelos virtuales creados.

Palabras clave: Acústica virtual, auralización, patrimonio acústico.

THE VIRTUAL RECONSTRUCTION OF THE PRIMITIVE SOUND OF THE MONASTERY OF PIEDRA:
ANALYSIS AND MODELLING OF THE CURRENT STATE

Abstract: *The use of acoustic virtual reality technologies makes it possible to restore the sound of historical sound spaces as these were in their original state. The process of creating acoustic models that allow this reconstruction consists usually of two phases. In the first phase, an acoustic model representing the current situation of the building is made. This virtual model of the current condition can be validated by comparing the acoustic behavior of the model with that of the building itself, obtained by in situ acoustic measurements. Once a validated model of the current situation is available, it can undertake the second phase in which, based on historical and archaeological documentation available, the acoustic model is modified so that it represents the conditions that had the building in the past. Thus, using a technique called auralization, it is possible to restore the building's original sound in its primitive state. The work presented here corresponds to the creation of virtual acoustic models of the current state of two of the spaces of Monasterio de Piedra: the chapter house and the refectory. For this, geometric models of the rooms have been generated, using the latest 3D planimetric representation technologies. These geometric models have served as the basis for the creation of the corresponding acoustic models. In addition, a campaign of acoustic measurements in situ has been carried out. The results have been used to validate the virtual models as well as to assess the current acoustics of these rooms.*

Keywords: *Virtual acoustics, auralization, acoustical heritage.*

INTRODUCCIÓN

El sonido es una parte fundamental de la experiencia perceptiva del entorno. Junto con los estímulos visuales, los estímulos auditivos conforman la mayor parte de lo que se denomina *mapa cognitivo del espacio*, que es la imagen perceptual que un individuo construye en su cerebro cuando experimenta un determinado entorno físico. Esta imagen perceptual se completa con otros aspectos subjetivos basados en cuestiones culturales y sociales en función de las experiencias que el individuo ha tenido a lo largo de su vida, lo que hace de la percepción del espacio un fenómeno único e individualizado para cada persona.

La experiencia sonora se compone de varios elementos. El primer elemento es la *emisión sonora*, que engloba la propia señal que se va a generar (la música o el texto que se canta o se declama) y las características de emisión de la fuente sonora (la potencia, la directividad y la respuesta en frecuencia del instrumento

musical o la voz que la genera). El segundo elemento es la *propagación sonora*, que tiene que ver con la modificación que el espacio sonoro produce sobre el sonido emitido por la fuente sonora en su trascurso desde la posición del emisor hasta la posición del receptor. Estos dos elementos configuran propiamente el sonido que llega al oyente. El tercer elemento es propio del oyente. Se trata de la *percepción sonora*, que incluye, tanto aspectos fisiológicos (la morfología del receptor, en la medida de que dicha morfología afecta a la señal que llega a sus tímpanos, su capacidad auditiva, etc.), como aspectos subjetivos asociados a lo que el sonido percibido significa para él.

Cuando se trata de recrear los sonidos del pasado es necesario tener en cuenta tanto la emisión como la propagación sonoras. Tradicionalmente, la musicología se ha centrado en la investigación de la emisión sonora. La mayoría de los estudios realizados se enfocan a la búsqueda y la transcripción de las fuentes musicales y también a la reconstrucción de los instrumentos musicales históricos. Con respecto a la propagación sonora, el problema es que los espacios en los que se producía la interpretación no suelen conservarse en las condiciones que tenían en el pasado. En algunos casos, los recintos han sufrido modificaciones a lo largo del tiempo que hacen que sus características acústicas actuales no se correspondan con las que tenían en el momento histórico que se intenta recrear. En otros muchos casos, los edificios se han perdido.

Las tecnologías de *realidad virtual* pueden ayudarnos a reconstruir el sonido de los espacios perdidos. La realidad virtual consiste en la simulación, normalmente mediante sistemas informáticos, de entornos virtuales que intentan producir en quien los usan sensaciones similares a las que experimentarían si estuvieran presentes en dichos entornos. Los sistemas de realidad virtual sustituyen en los usuarios los estímulos sensoriales del mundo real por otros estímulos que han sido modelados para que representen los del mundo virtual.

Tal y como se ha apuntado anteriormente, los estímulos sensoriales más importantes en la percepción del espacio son los visuales y los auditivos. Por eso, los sistemas de realidad virtual actuales se centran en estos dos tipos de estímulos. En aplicaciones donde el sonido solamente se utiliza para aportar verosimilitud al entorno virtual, como por ejemplo en los videojuegos, no es necesaria una recreación precisa del espacio sonoro. Sin embargo, si el entorno virtual se va a utilizar con una intención epistémica, tanto los estímulos visuales como los sonoros se deben crear con la máxima precisión, y con rigor científico.¹

¹ WEINZIERL, Stefan y LEPA, Steffen, 2017, pp. 61-80.

Denominamos *realidad acústica virtual* a la parte de la realidad virtual que se ocupa de la creación de los estímulos auditivos. Se basa lo que conocemos como *auralización*, definida como la técnica que permite crear señales audibles a partir de datos numéricos simulados, medidos o sintetizados artificialmente.² El resultado del proceso consiste en una señal de audio digital que, una vez reproducida mediante el sistema electroacústico apropiado, produce en el oyente una sensación sonora similar a la que experimentaría si estuviese presente en el entorno virtual que ha sido modelado. Para ello, hay que construir un *modelo acústico virtual*, que es un elemento en el que se modela la emisión sonora, la propagación sonora, y, en el caso de que la escucha se vaya a producir mediante auriculares, la parte de la percepción sonora que representa la repercusión de los aspectos morfológicos del oyente que afectan a la señal que llegaría al canal auditivo para cada uno de los dos oídos.

El trabajo que aquí se presenta se encuadra en un proyecto mayor cuyo objetivo es realizar una aplicación de realidad virtual que simule los aspectos acústicos y visuales de tres de los recintos del Monasterio de Piedra en su estado primitivo: el templo, la sala capitular y el refectorio. Este proyecto se desarrollará en varias etapas. Los modelos acústico y visual se llevarán a cabo por separado. Ambos modelos necesitan una representación geométrica tridimensional de cada espacio modelado, si bien los requisitos en cuanto al grado de detalle de esta representación son muy diferentes en ambos casos.

En concreto, el trabajo realizado hasta el momento se corresponde con la primera fase del modelo acústico virtual, que, como se verá a continuación, consiste en el modelado de los recintos de estudio en su estado actual. Dado que el templo se encuentra semiderruido, no tiene sentido generar un modelo acústico de su estado actual, por lo que el estudio que se presenta aquí se circunscribe a la sala capitular y al refectorio.

EL PROCESO DE CREACIÓN DE UN MODELO ACÚSTICO VIRTUAL

La creación de un modelo acústico virtual de un edificio histórico comprende el modelado de la emisión sonora y de la propagación sonora de acuerdo con los requisitos de estos elementos en el momento del tiempo elegido para su reconstrucción. Además, si la reproducción del sonido resultante se va a realizar mediante auriculares, será también necesario modelar la parte de la percepción

² VORLÄNDER, Michael, 2008.

sonora correspondiente al efecto de la morfología del oyente sobre la señal que llega a su canal auditivo en ambos oídos.³

El modelado de la emisión sonora es el responsable de asociar un sonido al entorno virtual, teniendo en cuenta las características de emisión sonora propias de los emisores acústicos que se pretenden emular. Para ello, es necesario grabar, en condiciones acústicas neutras (cámara anecoica), las señales que se van a tratar. También es necesario conocer la potencia y las características de emisión direccional de cada uno de los emisores.

Para modelar la propagación sonora se parte de una representación geométrica tridimensional del recinto con un grado de precisión adecuado.⁴ La representación debe incluir, no solamente la envolvente interior del recinto, sino, además, todos los elementos presentes, tales como mobiliario, elementos decorativos, etc. Posteriormente, a cada una de las superficies del modelo 3D se le asignan sus características acústicas específicas. El resultado final de esta etapa es una magnitud denominada *respuesta impulsiva*, que representa la propagación sonora desde la posición del emisor a la del receptor. Para ello se utilizan algoritmos de cálculo, normalmente basados en técnicas de acústica geométrica (fuentes imagen, trazado de rayos o modelos mixtos).⁵

Con respecto al receptor, la cabeza y el torso perturban las ondas sonoras mediante los fenómenos de reflexión y difracción, haciendo que la señal que llega a cada uno de los oídos sea diferente en términos temporales y de amplitud. Estas diferencias interaurales de tiempo y de amplitud son las que permiten al oyente la localización de la dirección de proveniencia del sonido y generan la impresión auditiva espacial. Cuando la escucha se realiza mediante auriculares, las señales se insertan directamente en los canales auditivos de los usuarios, por lo que se pierde esta habilidad de localización. Por tanto, será necesario introducir artificialmente los atributos que permitan una correcta audición espacial del entorno modelado. Las magnitudes que describen la perturbación sonora causada por la cabeza y el torso de una persona se denominan *funciones de trans-*

³ SAVIOJA, Lauri, LOKKI, Tapio y HUOPANIEMI, Jyri, 2002, pp. 219-224.

⁴ Al contrario que en el modelo visual, para el que se necesita una gran precisión geométrica, el modelado acústico, que se suele realizar mediante técnicas de acústica geométrica, necesita que los tamaños de las superficies sean superiores a las longitudes de onda de las frecuencias que se van a tratar, por lo que el grado de precisión geométrica debe ser bajo. Esto hace necesario trabajar con dos representaciones tridimensionales diferentes, una para cada modelo.

⁵ SAVIOJA, Lauri y SVENSSON, U. Peter, 2015, pp. 708-730.

ferencia referidas a la cabeza (HRTF).⁶ La composición de la respuesta impulsiva y las HRTF da como resultado la *respuesta impulsiva biaural*.

Finalmente, la auralización consiste en combinar, mediante una función matemática denominada *convolución*, la señal grabada en condiciones anecoicas con la respuesta impulsiva biaural y produce una pareja de señales de audio (una para cada oído), que introducidas en el canal auditivo del oyente le dan la impresión de escuchar las señales grabadas en el entorno virtual.

Para garantizar que un modelo acústico virtual se corresponde fielmente con el entorno físico que intenta emular, es conveniente efectuar una validación de este, comparándolo con el entorno real. Esto es imposible en edificios históricos cuando las características acústicas actuales han variado con respecto a las que los edificios tenían en el momento que se quiere simular. Por eso, cuando es posible, se realiza un primer modelo acústico virtual correspondiente al estado actual del recinto. Además, se realizan mediciones acústicas *in situ* en el entorno real. Este modelo del estado actual se valida comparando los valores de los parámetros acústicos resultantes de las mediciones con los que se derivan del modelo. También es posible realizar una valoración perceptual, comparando señales sonoras grabadas *in situ* con las auralizaciones derivadas del modelo.

Una vez que el modelo acústico virtual del estado actual se ha validado, a partir de la información histórica y arqueológica disponible se realizan los cambios necesarios en dicho modelo para que represente al estado que tendría el recinto en el momento histórico que se pretende simular.

MEDICIONES ACÚSTICAS

Con el objeto principal de validar los modelos acústicos virtuales del estado actual de los recintos, se han realizado mediciones acústicas y grabaciones sonoras *in situ* en la sala capitular y en el refectorio del Monasterio de Piedra. Las mediciones se han realizado siguiendo los criterios de la normativa internacional de aplicación.⁷

En cada uno de los recintos se han elegido diferentes posiciones de la fuente sonora y de los micrófonos con objeto de describir con precisión el campo acústico de las salas. En la sala capitular se han dispuesto tres posiciones de la fuente sonora y cinco posiciones de micrófono. En el refectorio se han elegido

⁶ HRTF: Acrónimo del inglés *Head-Related Transfer Functions*.

⁷ ISO 3382-1, 2009.

tres posiciones para la fuente sonora y 15 posiciones de micrófono. En todos los casos la altura de los micrófonos ha sido 1,2 m sobre el suelo. Las fuentes sonoras se han colocado a una altura de 1,5 m, salvo en el caso del refectorio donde una de las fuentes sonoras se ha ubicado en el púlpito.

Las mediciones acústicas se han realizado con el programa Dirac Room Acoustics Type 7841, utilizando el método de la respuesta impulsiva integrada. La señal de ensayo utilizada ha sido un barrido exponencial de frecuencias con una duración de 11,9 s, que se ha emitido mediante un altavoz dodecaédrico Brüel and Kjaer 4292.

Las señales se han registrado mediante micrófonos omnidireccionales DPA ST 4006. Además, para futuras investigaciones, también se ha utilizado un micrófono para investigación tridimensional del campo sonoro TSL Soundfield SPS200 y un Simulador de Cabeza y Torso Brüel and Kjaer Type 4100-D. La lámina 105 muestra la disposición de los equipos durante una de las sesiones de medición.

En las tablas siguientes se muestra un resumen de los resultados de las mediciones. Se trata de los valores medios de los principales parámetros acústicos. Se incluyen dos descriptores del *tiempo de reverberación* (T_{30} y EDT), el *tiempo central* (T_3) como indicador de la relación entre energía inicial y energía tardía, la *definición* (D_{50}) para evaluar la claridad de la voz, la *claridad* (C_{80}) para evaluar la claridad de la escucha musical y el índice de transmisión del habla (STI) para valorar la inteligibilidad.

Comparando los valores obtenidos con los recomendados para los diferentes usos de las salas, podemos decir que el refectorio, en su estado actual, presenta una reverberación excesiva, lo que le hace inapropiado, tanto para aplicaciones de voz hablada como para aplicaciones musicales. Esto se debe al carácter reflectante del tratamiento actual de las superficies límite y a la ausencia de elementos absorbentes del sonido en el interior, como mobiliario u otros elementos decorativos.

Sin embargo, la sala capitular posee, en su estado actual, unas características acústicas excelentes, tanto para la voz como para la música. Con respecto a su uso para aplicaciones vocales, el valor promedio del índice de transmisión del habla (STI) es de 0,59, lo que corresponde a una inteligibilidad calificada como *buena* de acuerdo con las escalas de valoración subjetiva de este parámetro. Además, la desviación típica de los valores individuales de STI en los diferentes puntos de medida es muy baja (0,02) lo que indica que la inteligibilidad es uniforme en todo el recinto. En cuanto a su uso en aplicaciones musicales, el tiempo de reverberación a frecuencias medias concuerda con los valores re-



Lám. 105. Imagen de una de las sesiones de medición en la sala capitular del Monasterio de Piedra.

Frecuencia, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT, s	4,89	5,75	6,13	6,28	5,83	4,61	2,79	1,59
T30, s	6,00	6,23	6,30	6,33	5,92	4,78	3,12	1,72
TS, ms	322	372	412	438	405	321	195	106
D50	0,25	0,18	0,14	0,11	0,15	0,17	0,24	0,38
C80, dB	-3,03	-4,85	-5,62	-6,67	-6,08	-4,93	-2,85	0,15
STI								0,33

Frecuencia, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT, s	2,01	1,56	1,37	1,27	1,17	1,06	0,81	0,60
T30, s	1,75	1,43	1,32	1,25	1,20	1,08	0,85	0,65
TS, ms	119	104	100	80	78	73	56	43
D50	0,50	0,30	0,43	0,52	0,42	0,46	0,53	0,57
C80, dB	1,58	-0,04	1,26	2,30	2,78	3,08	4,96	7,04
STI								0,59

Lám. 106. Tablas 1 y 2 donde se contienen los resultados de las mediciones en el Refectorio y la Sala Capitular.

comendados para música de cámara en recintos de ese volumen.⁸ Además, la curva tonal de la reverberación presenta un moderado incremento en las bajas frecuencias y una caída no demasiado acusada en las frecuencias altas. Esto confiere a la reverberación una calidez y un brillo adecuados.

LA GENERACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

Tal y como se ha expuesto anteriormente, tanto el modelo visual como el modelo acústico de una aplicación de realidad virtual se basan en una representación geométrica tridimensional del entorno que se quiere simular. La cuestión es que ambos modelos necesitan una precisión geométrica diferente. Mientras que la virtualización visual requiere una alta precisión geométrica, el modelo acústico no debe tener superficies mucho más pequeñas que las longitudes de onda de las frecuencias que se van a tratar.

La solución adoptada ha sido realizar un levantamiento planimétrico tridimensional lo más preciso posible, haciendo uso de las últimas tecnologías disponibles, y simplificar la geometría posteriormente para adecuarla a las necesidades del modelo acústico.

Para la obtención de los productos topográficos utilizados en el estudio se han utilizado dos tecnologías distintas de adquisición de información geoespacial:

1: Se han adquirido imágenes utilizando un equipo RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), sobre las que, utilizando técnicas fotogramétricas, se han obtenido productos topográficos, entre los que cabe destacar un modelo 3D de la iglesia, un modelo digital de elevaciones y una ortofotografía.

2: Se han adquirido una nube de puntos utilizando un scanner-laser tanto de la sala capitular como del refectorio.

Las características de los equipos utilizados y los productos obtenidos son las siguientes:

Para la obtención de productos fotogramétricos a partir de imágenes con RPAS se utilizó un equipo RPAS DJI Phantom 3, el cual cuenta con una cámara FC300S de 12 megapíxel de resolución (4000x3000) y una distancia focal de 3.61 mm. El número total de imágenes adquiridas fue de 68 tomadas utilizando el método de rejilla doble a una altura de 45 m sobre el terreno y con un solapamiento del 70 %. Para el tratamiento de las imágenes adquiridas se utilizó el software fotogramétrico Agisoft Photoscan, obteniendo como re-

⁸ ARAU, Higini, 1999.

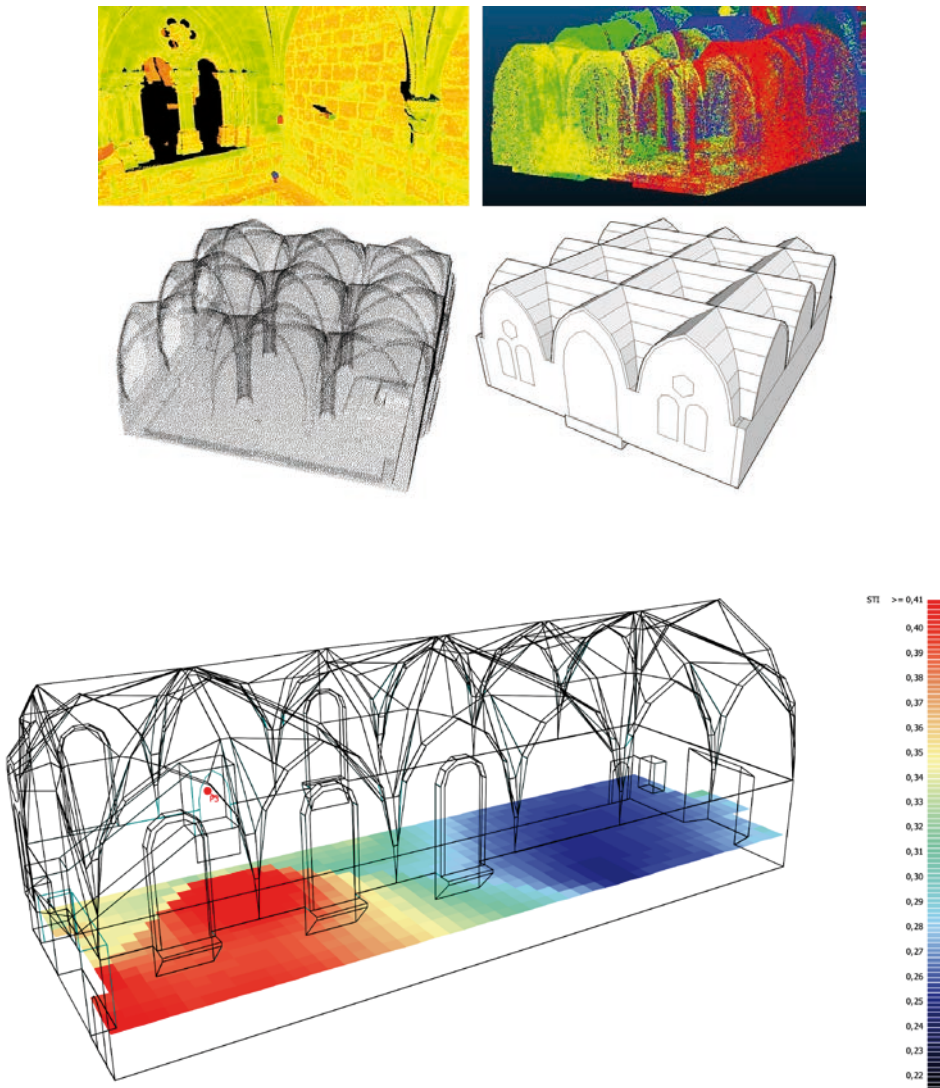


Lám. 107. Productos fotográficos a partir de toma de imágenes con RPAS. Arriba imágenes del modelo 3D Texturado. Abajo a la izquierda, modelo digital de elevaciones. Abajo, a la derecha, ortofotografías. Iglesia abacial de Santa María de Piedra.

sultado una nube densa de puntos constituida por un total de 5,7 millones de puntos, un modelo 3D texturado, un modelo digital de elevaciones de 7,25 cm de resolución y una ortofotografía de 1 cm de resolución espacial. La lámina 107 muestra los resultados obtenidos con esta tecnología.

El escaneo se realizó utilizando un equipo Scanstation C10 de la empresa Leica. Se trata de un equipo que permite un escaneo de alta precisión y largo alcance mediante la utilización de un espejo Smart X-Mirror™ el cual gira y oscila automáticamente, teniendo un *FOV* (*field of view*) de 360 x 270°.

Los productos obtenidos con el escáner-láser fueron varias nubes de puntos de muy alta densidad. Para el procesado de los datos obtenidos, con el fin de unir las distintas nubes parciales obtenidas y de reducir el número de puntos disponibles, se utilizó tanto el software propio de Leica, como el software libre Cloudcompare. El resultado final fue una nube de puntos de tamaño reducido, capaz de ser utilizada dentro de los distintos programas de análisis acústico. Con el fin de realizar una visualización en 3D de los productos utilizados y obtenidos tras los procesos seguidos, también se utilizó el software ArcGis. Finalmente, a partir de la nube de puntos, se ha generado un plano tridimensional de superficies en el programa SketchUp, que es el que se importará al software de simulación acústica. La lámina 108 presenta los diferentes tratamientos de los resultados obtenidos con el escaneo 3D.



Lám. 108a. Arriba, a la izquierda, ejemplo de una de las nubes de puntos obtenidas con el escáner-laser. Arriba, a la derecha, integración de las distintas nubes de puntos en Cloudcompare. Abajo, a la izquierda, nube de puntos definitiva vista en ArcScene. Abajo, a la derecha, simplificación geométrica optimizada para el modelado acústico en SketchUp. Sala capitular del Monasterio de Piedra.

Lám. 108b. Distribución espacial del Índice de Transmisión del Habla (STI) en el refectorio con la fuente sonora situada en el púlpito. Refectorio del Monasterio de Piedra.

CREACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO ACÚSTICO VIRTUAL DEL ESTADO ACTUAL

El modelo acústico virtual se ha realizado con el programa de simulación acústica ODEON. Este programa está basado en acústica geométrica y utiliza un algoritmo híbrido que combina diferentes métodos de cálculo para determinar la respuesta impulsiva entre la posición del emisor y el receptor.

Para la creación y calibración de cada uno de los modelos se ha seguido el siguiente procedimiento:⁹

En primer lugar, se ha importado en ODEON el modelo geométrico optimizado con SketchUp.

A cada una de las superficies del modelo geométrico se le han asignado las características acústicas de los materiales de las que están constituidas. Para los coeficientes de absorción, se ha partido de los valores de los materiales más similares contenidos en la base de datos de ODEON. Los coeficientes de dispersión se han asignado en función de la irregularidad geométrica de cada superficie.¹⁰

Se ha realizado un primer cálculo de los principales parámetros acústicos replicando las posiciones de las fuentes sonoras y los micrófonos utilizadas en las mediciones.

Aplicando un algoritmo genético,¹¹ se han optimizado los valores de los coeficientes de absorción sonora asignados a los diferentes materiales del modelo de forma que los valores de los parámetros acústicos calculados en la simulación y los valores medidos *in situ* no difieran en más de 1 *JND*.¹²

Una vez ajustados los coeficientes de absorción, se ha evaluado la sensibilidad del modelo a las variaciones de los coeficientes de dispersión y se han seleccionado los valores de estos coeficientes que mejor ajustan el modelo a las mediciones *in situ*.

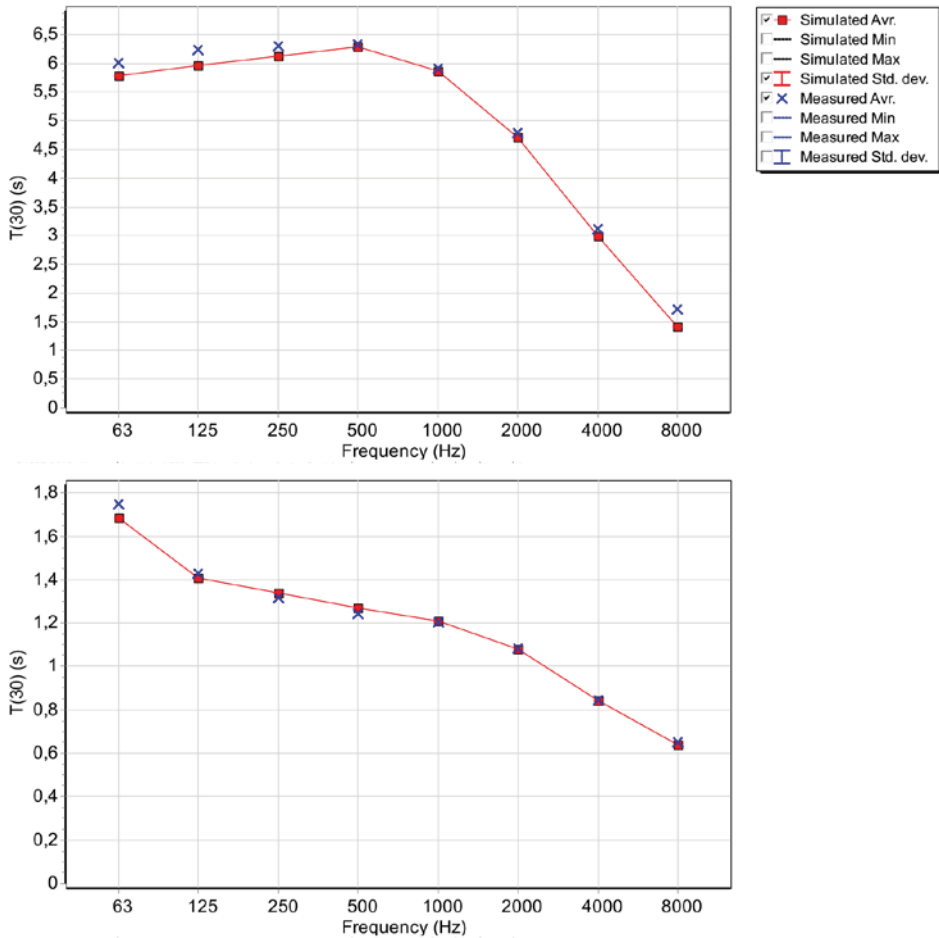
La lámina 109 muestra la comparación entre los promedios de los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) medidos y los simulados. Como puede comprobarse, con el ajuste realizado se ha conseguido un alto grado de concordan-

⁹ POSTMA, Barteld; N. J. y KATZ, Brian F. G., 2015, pp. 161-180.

¹⁰ CHRISTENSEN, Claus Lyngé y RINDEL, Jens Holger, 2005.

¹¹ CHRISTENSEN, Claus Lyngé; Koutsouris, George y RINDEL, Jens Holger, 2014.

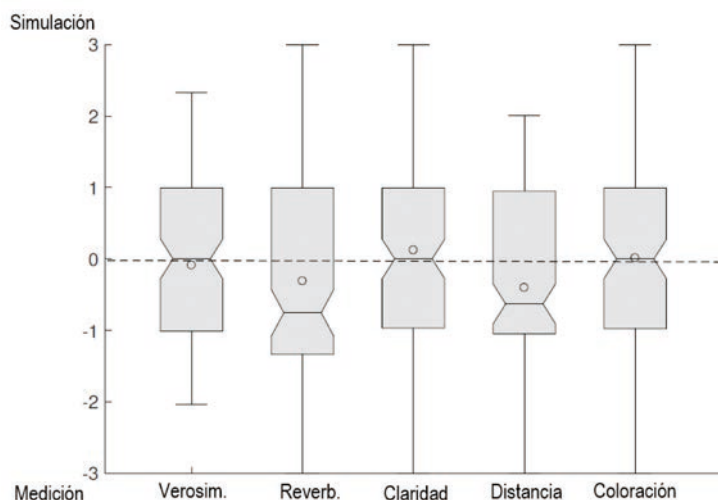
¹² *JND*, acrónimo del inglés *Just Noticeable Difference*, es una cantidad que representa la mínima diferencia perceptible en un determinado parámetro. Los valores de *JND* para los principales parámetros acústicos están detallados en la norma ISO 3382-1:2009.



Lám. 109. Comparación de los valores medidos y simulados del tiempo de reverberación (T30). Arriba, refectorio, Abajo, sala capitular.

cia entre la medición y la simulación. El resto de los índices acústicos sigue la misma tónica, quedando las diferencias de todos los parámetros usados en la calibración por debajo de los correspondientes *JND*.

Además de la calibración anteriormente expuesta, basada en la comparación de parámetros objetivos obtenidos de la medición y del modelo virtual, se ha realizado una prueba perceptual con objeto de conocer hasta qué punto las auralizaciones realizadas con los modelos se asemejan al sonido real de los espacios estudiados. Para ello, durante la campaña de mediciones se grabaron, en varios



Lám. 110. Resultados de la prueba de escucha subjetiva. Los segmentos verticales representan el rango de valores; las cajas, los cuartiles del 25% y del 75%; las bendiduras, el intervalo de confianza del 95%; la línea central, la mediana; (o) el valor medio.

puntos de cada recinto, una serie de señales emitidas por un altavoz calibrado. En concreto se utilizaron dos señales anecoicas, una de voz hablada y otra de voz cantada. Esas mismas señales han servido como base de sendas auralizaciones en los modelos acústicos virtuales, en los que se ha modelado el mismo tipo de altavoz con el que se realizaron las grabaciones. Para cada uno de los recintos se han seleccionado dos puntos de análisis, lo que ha dado como resultado 6 señales grabadas *in situ* y 6 señales auralizadas en los modelos. Teóricamente, en el caso de que los modelos representasen exactamente la realidad, cada una de las señales grabadas debería ser idéntica a su correspondiente señal auralizada.

Con estas señales se ha realizado una prueba perceptual de escucha (*listening test*) en la que, a un número determinado de oyentes se les presentan auditivamente las dos señales que deberían ser idénticas (la grabada *in situ* y la auralizada en el modelo) y se les pregunta si perciben diferencias entre ambas.

La prueba ha constado de dos partes, la primera se ha basado en la recomendación BS.1116,¹³ que es una especificación destinada a evaluar pequeñas diferencias en señales de audio. El método utilizado es el conocido como *triple*

¹³ ITU-R BS.1116-3

estímulo doblemente ciego con referencia oculta y consiste en presentar al oyente 3 estímulos sonoros, *A*, *B* y *C*. En nuestro caso, uno de ellos es la señal medida, otro es la señal auralizada y para el tercer estímulo se repite una de las dos señales anteriores. La asignación de las letras a los fragmentos se realiza aleatoriamente. Al participante se le pide que identifique cuál de las señales suena diferente a las otras dos. En la segunda parte, se muestra al participante una imagen del recinto en cuestión para que tenga una referencia visual de la sala a la que corresponden los sonidos que va a escuchar. A continuación, se le presentan dos señales de audio, la señal grabada y la auralizada, y se le pide que compare una serie de cualidades de ambas señales en una escala de 7 valores. Las cualidades evaluadas han sido: verosimilitud, reverberación, claridad, distancia y coloración.

Para realizar la prueba y registrar los resultados, se ha diseñado una aplicación en Matlab que automatiza la secuencia de operaciones necesarias. Las pruebas se han realizado en una cabina insonorizada DEMVox ECO100, utilizando unos auriculares Sennheiser HD650 y un amplificador RANE HC6S. El número de participantes ha sido 17, con edades entre los 19 y los 67 años.

El resultado de la primera parte es que en el 17% de los casos, el participante es incapaz de distinguir el sonido real del sonido virtual. En el 83% restante se aprecian diferencias entre la grabación *in situ* y la auralización, si bien estas diferencias son pequeñas en la mayoría de las ocasiones. Cabe destacar que el método de evaluación adoptado en esta primera parte de la prueba es el que se aplica para detectar variaciones muy sutiles en las señales de audio, por ejemplo, en la evaluación de codificadores digitales. Los resultados de la segunda parte de la prueba se presentan en la lámina 110. A la vista del gráfico se puede concluir que existe una gran dispersión de los resultados. En promedio, el sonido real y el sonido simulado son prácticamente iguales en términos de verosimilitud, claridad y coloración. Las auralizaciones producen una percepción ligeramente inferior de la reverberación y de la sensación de distancia a la fuente sonora.

Con estos resultados, los de la calibración objetiva de los modelos acústicos y los de la validación perceptual de estos, estamos en condiciones de afirmar que los modelos virtuales creados para el refectorio y la sala capitular del Monasterio de Piedra responden fielmente a las características acústicas de estos espacios en su estado actual.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha cumplimentado la primera fase de la reconstrucción virtual del sonido primitivo del Monasterio de Piedra, consistente en la creación y validación de los modelos acústicos virtuales del estado actual de las salas. Debido al estado de conservación del templo del monasterio, que no permite una modelización acústica precisa, esta primera fase se circunscribe al refectorio y a la sala capitular, de manera que la reconstrucción acústica virtual de la iglesia se realizará en la siguiente fase, sin el apoyo de un modelo previo calibrado en el que basarse.

Para generar los modelos geométricos de los recintos se han utilizado las tecnologías de información geoespacial más novedosas. Esto ha permitido obtener una planimetría tridimensional de los recintos (incluida la iglesia) muy detallada, que podrá utilizarse en la parte visual de los modelos virtuales, además de otras posibles aplicaciones en el futuro.

Para poder calibrar los modelos acústicos del estado actual del refectorio y de la sala capitular, se han efectuado mediciones acústicas en ambos recintos que nos permiten valorar sus condiciones acústicas. Se ha comprobado que el refectorio posee una reverberación muy acusada, por lo que sus características acústicas no son apropiadas ni para la comunicación hablada ni para la música. Aún así, el púlpito produce un efecto focalizador que mejora notablemente la inteligibilidad en el entorno próximo. Con respecto a la sala capitular, las mediciones revelan unas excelentes condiciones acústicas, con una alta inteligibilidad del habla en todo el recinto y con una reverberación moderada que se encuentra en el rango recomendado para la música de cámara.

Se han generado los modelos acústicos virtuales del refectorio y de la sala capitular en su estado actual. Estos modelos se han calibrado por métodos objetivos, comparando los valores de los principales índices acústicos calculados a partir de los modelos con los valores obtenidos en las mediciones acústicas. Una vez ajustados los modelos se ha realizado una validación perceptual de estos mediante una prueba subjetiva de escucha que ha arrojado resultados satisfactorios en ambos casos.

Todo esto permite abordar las siguientes etapas de la virtualización de los espacios en su estado primitivo. De acuerdo con la documentación histórica y arqueológica disponible, se modificarán los modelos acústicos del refectorio y de la sala capitular para que se adecuen a las condiciones acústicas que estos recintos tenían en el momento que se desee recrear. Asimismo, se creará un modelo acústico de la iglesia que, si bien no cuenta con un modelo del estado

actual en el que apoyarse, dispone de una planimetría tridimensional detallada que servirá de base para el levantamiento del modelo geométrico.

Por otra parte, se debe completar la caracterización de lo que hemos denominado la emisión sonora. Esto engloba un estudio musicológico para determinar las piezas musicales que se interpretaban en estos recintos, así como los textos que previsiblemente se declamaban en los que no tenían un uso musical. Estas músicas y textos se grabarán en una cámara anecoica y serán las señales que se utilizarán en las auralizaciones. Además, se deberán determinar las posiciones y los movimientos de los emisores sonoros y de los receptores que se pretendan simular. En el caso de los receptores, se implementará la parte fisiológica de la percepción sonora mediante la inclusión en el sistema de las *HRTF* correspondientes.

Con esto quedaría completada la reconstrucción virtual del sonido primitivo de las salas más representativas del monasterio. En fases posteriores se abordaría la creación de los modelos visuales correspondientes para proceder a una recreación completa en un sistema interactivo de realidad virtual.