

# EL ESTUDIO ACÚSTICO DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS DESDE UNA PERSPECTIVA GLOBAL

**Antonio Pedrero González**

Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica. Universidad Politécnica de Madrid  
{e-mail: antonio.pedrero@upm.es }

## Resumen

Existen dos enfoques posibles a la hora de abordar el estudio acústico de un edificio patrimonial. El primero consiste en considerar el edificio como un mero espacio físico, mientras que en el segundo se analiza el edificio en su dimensión de artefacto cultural. En este último caso, el objetivo principal del estudio es comprender cómo las características acústicas de los recintos responden a las necesidades funcionales de la sociedad de su tiempo y qué papel jugó el sonido en la identidad cultural de los usuarios del edificio.

El estudio acústico de los edificios como elementos culturales requiere una perspectiva de análisis global, en la que la acústica no es la única ciencia que entra en juego. Este tipo de análisis requiere el concurso de otras disciplinas científicas como pueden ser la musicología, la arqueología, la historia o la sociología. Además, se debe emplear una metodología que garantice el rigor científico y la transparencia intelectual.

**Palabras clave:** acústica, edificios históricos, acústica virtual, auralización.

## Abstract

There are two possible approaches when addressing the acoustic study of a heritage building. The first one consists in considering the building as a mere physical space, while in the second the building is analyzed in its dimension as a cultural artifact. In the latter case, the main objective of the study is to understand how the acoustic characteristics of the enclosures meet the functional needs of the society of his time, and what role did the sound in the cultural identity of users of the building.

The acoustic study of buildings as cultural elements requires a global analysis perspective, in which acoustics is not the only science that comes into play. This type of analysis requires the participation of other scientific disciplines such as musicology, archeology, history or sociology. Furthermore, the methodology used must guarantee scientific rigor and intellectual transparency.

**Keywords:** acoustics, heritage buildings, virtual acoustics, auralization.

**PACS n°.** 43.55.Gx, 43.55.Ka

## 1 Introducción

Los sonidos han jugado un papel fundamental en la identidad cultural de la humanidad. Desde que tenemos conocimiento, las diferentes civilizaciones han creado sus propios códigos sociales utilizando el sonido como elemento de comunicación y de cohesión cultural. Como ejemplo destacado, el sonido

ha tenido un papel importantísimo en las manifestaciones religiosas, subrayando el carácter místico de las ceremonias y disponiendo a sus asistentes en un estado mental propicio para participar en la liturgia. Dado que el sonido se produce a través del espacio, el entorno acústico se convierte en un elemento indisoluble de este a la hora de configurar la experiencia auditiva de los individuos. De manera intencionada o casual, consciente o inconsciente, cada sociedad ha definido su propia arquitectura aural [1] para imprimir a los sonidos el carácter que sus necesidades sociales, culturales o religiosas demandan. Esto confiere a los edificios históricos una dimensión adicional en su papel de objetos culturales. Además de los aspectos arqueológicos o artísticos de los edificios, su acústica también es importante para entender a los individuos y las sociedades que los han creado.

El interés por las características acústicas de los edificios históricos se ha incrementado notablemente en los últimos años. Esto queda demostrado por la cantidad de publicaciones científicas que se han producido, en las que se presentan resultados de mediciones acústicas o reconstrucciones virtuales de edificios de otras épocas. La mayor parte de los estudios publicados se refieren iglesias cristianas [2], aunque también hay publicaciones que analizan la acústica de edificios de culto de otras confesiones religiosas [3][4]. Son menos frecuentes, pero también se encuentran en la literatura, estudios sobre la acústica de otros tipos de edificios históricos, tales como teatros [5][6][7] o salas palaciegas [8][9], entre otros.

Hay dos formas de abordar el estudio acústico de un edificio patrimonial: considerando el edificio como un espacio físico o como un artefacto cultural.

Pertencen al primer tipo de enfoque los estudios que intentan analizar algunos aspectos particulares del comportamiento acústico de los recintos en sí mismos, como por ejemplo los trabajos destinados a estudiar la propagación de la energía acústica en iglesias [10][11][12]. La complejidad geométrica de muchos de los edificios patrimoniales los convierte en casos de estudio idóneos para investigar fenómenos acústicos particulares como, por ejemplo, el acoplamiento acústico [13] o los efectos producidos por las bóvedas u otras superficies curvas [14]. También pertenecen a este tipo de estudios los trabajos en los que se ha analizado la relación entre el comportamiento acústico y las características arquitectónicas de los edificios [15][16]. Como último ejemplo de este tipo de enfoque podemos citar los trabajos en los que se evalúa la idoneidad de los recintos históricos para aplicaciones actuales tales como producción de conciertos, conferencias etc., en los que se aplican, como parámetros de evaluación, los índices acústicos comúnmente aceptados para valorar las condiciones acústicas de los recintos actuales [17][18]. En todos estos casos la única disciplina involucrada es la ciencia acústica.

Sin, embargo, si lo que se pretende es estudiar un edificio histórico en su condición de artefacto cultural, la perspectiva de análisis es completamente diferente. Dado que el espacio construido es una manifestación material de la cultura que lo creó o que lo usó, el objetivo último de su análisis no es tanto conocer sus características físicas como entender su relación con el grupo cultural al que sirvió. Cuando nos referimos ahora a las características acústicas del espacio lo que nos interesa es comprender cómo estas características formaron parte de la sociedad de su tiempo y qué papel jugó el sonido en la identidad cultural de los pueblos que usaron el edificio.

De acuerdo con Carrero [19], “un espacio histórico es innegablemente físico, tiene un uso social y se percibe desde una perspectiva abstracta, mental”. Estas tres categorías, la física, determinada por el entorno material, la social, asociada a la funcionalidad del espacio, y la mental, relacionada con la percepción sonora, son partícipes en igual medida en la consideración del edificio histórico como un artefacto cultural.

Los edificios, y los elementos que contienen, van cambiando con el tiempo adaptándose a nuevas necesidades funcionales o estéticas impuestas por modificaciones de los usos o, simplemente, por el cambio de gusto. Los cambios culturales también modifican la reacción de las personas ante la percepción del entorno. Así, aún sin haber sufrido modificaciones con el paso de los años, un mismo edificio podría tener distintas interpretaciones culturales en diferentes momentos históricos. Por eso, este tipo de análisis debe tener un escenario temporal definido que fija el contexto histórico al que se refiere el estudio. Una vez establecido el escenario temporal se deben considerar, no solamente el

entorno físico en ese momento del tiempo, sino todos los aspectos que condicionaron la experiencia perceptual de los oyentes: la propia señal sonora que se utilizaba, las posiciones y movimientos de los emisores y receptores en función del uso del edificio que se está analizando y, lo que es más difícil, la reacción de los oyentes de la época frente al sonido percibido en función de sus condicionantes culturales y sociales. Es decir, el estudio debe incorporar las tres perspectivas mencionadas anteriormente, la físico-arquitectónica, la funcional y la perceptual, las tres con la misma importancia, asociadas a un determinado contexto histórico. De todo esto se deduce que el estudio acústico de un edificio histórico, en su calidad de objeto cultural, necesita un enfoque multidisciplinar en el que la ciencia acústica debe apoyarse en otras disciplinas científicas.

Una de las cuestiones recurrentes en este tipo de trabajos es la falta de información precisa sobre algunos de los aspectos anteriormente citados. Este problema supone una importante fuente de incertidumbre que se acentúa cuanto más distante en el tiempo está el horizonte temporal del estudio. Es también frecuente encontrar que no hay consenso en la comunidad científica sobre alguna cuestión necesaria para abordar el estudio acústico del edificio. En estos casos el equipo de investigación tiene que establecer su propio criterio y valorar y comunicar las implicaciones de las decisiones tomadas sobre la validez del estudio.

Por otra parte, la metodología de trabajo, bien sea basada en mediciones, grabaciones o en simulaciones, incorpora fuentes adicionales de incertidumbre que deben ser tenidas en cuenta para la valoración de los resultados obtenidos.

Finalmente, sea cual sea la finalidad del estudio y el formato en el que se divulguen sus resultados, se deben respetar los principios de rigor académico en cuestiones como integridad y transparencia intelectual, documentación y acceso.

## **2 Aspectos metodológicos**

### **2.1 Objeto del estudio**

El primer aspecto que hay que determinar a la hora de planificar el estudio acústico de un edificio histórico es el objetivo que se propone con dicho estudio. En un sentido amplio, un estudio de este tipo puede tener dos posibles finalidades: la investigación científica, es decir, la creación de conocimiento sobre el edificio, o la divulgación del patrimonio cultural.

Toda investigación científica deber tener un objetivo claro y ese objetivo condiciona absolutamente la totalidad de las fases del trabajo, desde la elección de la metodología a emplear a la forma de comunicar los resultados. Lo mismo ocurre con la divulgación del patrimonio cultural, en la que la cuestión en sí que quiere ser divulgada y el tipo de público a la que va dirigida implica plantearse la idoneidad de los métodos en relación con los objetivos perseguidos. En cualquiera de los dos casos, el objetivo del estudio condiciona el escenario temporal del análisis y, a su vez, el tipo y formato de los resultados del análisis. En cuanto al tipo de resultados del análisis, básicamente hay dos opciones no excluyentes entre ellas: números o sonidos. Existirán ocasiones en las que los valores numéricos de los índices acústicos obtenidos en el edificio aporten suficiente información como para resolver la pregunta de investigación planteada. Como parte positiva de esta opción, los índices acústicos habituales están normalizados [20] y toda la comunidad científica está familiarizada con su significado. La parte negativa es la duda sobre la utilidad de estos índices en los recintos históricos. Los índices acústicos que se utilizan habitualmente se han desarrollado para valorar la calidad acústica de un tipo particular de salas, las salas de espectáculo existentes en la actualidad (teatros, auditorios, etc.). No se puede asegurar que estos índices, sus valores óptimos y sus lómines perceptuales [21] sean válidos para todo tipo de espacios y todo tipo de programas sonoros, ni tampoco que representen el juicio de los oyentes de otros tiempos. Además, la interpretación

del significado sonoro de los valores de los índices acústicos está limitada a los expertos, por lo que no se podrían utilizar para aplicaciones de divulgación cultural.

La alternativa a los números como resultado del estudio acústico de los edificios patrimoniales es proporcionar los sonidos que se producían en el entorno bajo estudio en el momento histórico que se está analizando. Si esto se realizase con rigor, los sonidos generados representarían los estímulos auditivos que recibirían los oyentes en el pasado.

Cuando el entorno acústico actual de un edificio histórico no ha cambiado con respecto a como era en el pasado, tanto los índices acústicos como los sonidos se pueden obtener in situ mediante mediciones o grabaciones, respectivamente. Sin embargo, si se han producido a lo largo del tiempo modificaciones en la arquitectura o en otros elementos, tales como recubrimientos, mobiliario, ornamentos, etc., que pudieran afectar a la acústica del recinto, será necesario recurrir a programas de simulación para obtener los índices acústicos del espacio primitivo. Los sonidos de los edificios en sus estados pretéritos también se pueden obtener mediante estos programas de software por medio del proceso de *auralización* [22], lo que da lugar a lo que se denomina acústica virtual, y que constituye una herramienta fundamental para el estudio acústico de los edificios del pasado.

## 2.2 La perspectiva física

La forma, el volumen y las características de los materiales que los componen configuran la acústica de los edificios y confieren a los sonidos que en ellos se producen una identidad propia que combina, de manera indisoluble, la naturaleza sonora de la señal emitida y el efecto de la propagación de la energía acústica a través del recinto. Por eso, la consideración de las características físicas del espacio es fundamental para el estudio acústico de cualquier edificio, incluyendo los edificios patrimoniales.

Tal y como se ha comentado anteriormente, los edificios van cambiando a lo largo del tiempo, de manera que son muy pocos los edificios históricos que se conservan tal y como fueron concebidos. Las razones de los cambios pueden ser muy diversas como, por ejemplo, la necesidad de acoger nuevas funcionalidades, acometer reparaciones para salvaguardar su integridad, o, incluso, adaptarse a nuevas tendencias estéticas. Estos cambios se producían de una manera natural e inopinada hasta finales del siglo XVIII, cuando la sociedad empieza a tomar consciencia del valor cultural del patrimonio construido. Hasta entonces, la práctica habitual era conservar la obra vieja que se consideraba útil y realizar las modificaciones oportunas según el gusto de la época, sin pretender imitar lo antiguo. Las corrientes restauracionistas del siglo XIX tampoco supusieron la conservación física de los edificios históricos, más bien al contrario. La postura preponderante fue la que abanderó Viollet le Duc, que consistía en “recuperar el esplendor inicial del monumento”, dijo, “o el que pudo tener...”. Esta filosofía supuso la eliminación de numerosos elementos arquitectónicos en los edificios restaurados y, en muchos casos, la interpretación creativa de lo que podrían haber sido sus formas en la antigüedad. Por otra parte, los ideólogos del *movimiento moderno*, que han sido una influencia importantísima en los arquitectos del siglo XX, identificaron la esencia de la arquitectura con la piedra desnuda y los grandes espacios vacíos, con lo que desaparecieron los revestimientos y la mayoría de los ornamentos y del mobiliario en un gran número de edificios patrimoniales. Todas estas cuestiones hacen que, en la mayoría de las ocasiones, no sea posible realizar un estudio acústico, con una perspectiva histórica, basado en el estado actual de los edificios.

Cuando se intenta realizar un estudio acústico de un edificio en una época anterior es necesario replicar el entorno físico en ese momento histórico identificando los cambios que ha experimentado con respecto a su estado actual. El entorno físico que nos interesa no se circunscribe al espacio arquitectónico, entendiendo como tal el que define las formas, los volúmenes y los materiales, sino que incluye todos los elementos adicionales (ornamentos, mobiliario, etc.) que condicionan el comportamiento acústico del recinto.

Salvo en los edificios más antiguos, las modificaciones del espacio arquitectónico suelen estar bien documentadas, por lo que su identificación puede ser realizada fácilmente por arquitectos o historiadores

del arte con tal de que tengan acceso a las fuentes documentales apropiadas. Cuanto más nos alejamos en el tiempo más pequeña es la posibilidad de que las transformaciones realizadas en los edificios estén correctamente documentadas. Tal es el caso de muchos de los edificios altomedievales, para los que los arqueólogos se afanan por encontrar indicios que permitan conocer sus formas originales y la manera en la que han ido evolucionando con el paso de los siglos.

Aparte de los cambios estructurales, hay otra serie de modificaciones que afectan a las condiciones acústicas del edificio, como son los cambios en los revestimientos, en los elementos ornamentales y en el mobiliario.

La imagen pétreo que presenta en la actualidad un gran número de edificios patrimoniales probablemente diste mucho de la que tuvieron en épocas pasadas. La práctica usual era recubrir la piedra con morteros con objeto de protegerla. Los tipos de morteros utilizados fueron diversos, tanto en lo referente a los aglomerantes usados (dependiendo de la zona geográfica se utilizaban morteros de cal, morteros de yeso o morteros bastardos de cal y yeso), como en lo relativo a la granulometría de los áridos, en la utilización de aditivos o en el acabado (muchos de los revestimientos estaban pintados). Todos estos factores condicionan la porosidad del mortero y, por tanto, sus características acústicas, con lo que variaciones en su composición podría dar lugar a diferencias significativas en los coeficientes de absorción sonora. Cabe mencionar que se han documentado algunos morteros históricos cuya capacidad de absorción sonora es muy superior a los morteros actuales [23]. Para complicar más este asunto, hay que tener en cuenta que los revestimientos se renovaban cada cierto tiempo debido a la suciedad que producían las velas y las antorchas que se utilizaban para la iluminación. Por ejemplo, en la catedral de Toledo se tiene evidencia de tres estratos en el revestimiento de los muros correspondientes a tres épocas bien diferenciadas: uno anterior a 1526, otro que se mantuvo de 1526 a 1775 y el último, de 1775, que es el que hay en la actualidad; cada uno de estos estratos poseían dosificaciones, aditivos y terminaciones diferentes [24]. No es sencillo obtener información sobre la composición del revestimiento de los muros en un edificio para un momento del tiempo determinado. En ocasiones, esta información se encuentra en fuentes indirectas. Tal es el caso de la mezquita de Süleymaniye, de la que sabemos cuál fue el aditivo textil que se utilizó en el mortero de las cúpulas gracias a una anotación en los libros de cuentas de la construcción en la que se detalla que se adquirieron 139 piezas de lino para este fin[25].

La mayoría de los edificios históricos que se estudian actualmente fueron en su tiempo construcciones importantes, tales como palacios, catedrales, etc., que debieron estar altamente decorados con tapices, cortinajes, alfombras y todo tipo de elementos ornamentales. Algunos de estos elementos estarían instalados de forma permanente, mientras que otros se instalarían para una ocasión especial. Por ejemplo, para ceremonias particulares, las catedrales instalaban elementos textiles que realizaban una compartimentación del espacio, lo que reduciría notablemente la reverberación [24]. Además, los ornamentos de los altares y del coro de las catedrales podían cambiar a lo largo del día para adaptarse a las necesidades de las diferentes ceremonias que se celebraban en ellos [19], afectando en consecuencia las condiciones acústicas. Por esta razón, es necesario definir exactamente el momento histórico en el que se encuadra el análisis, y en ocasiones, no solo referirse a un momento del tiempo sino incluso a un acto o ceremonia en particular.

Poco o nada queda del mobiliario original en los edificios históricos más antiguos. Las arcas, baúles y cofres, armarios, cómodas, aparadores, escritorios, escribanías, mesas y sillas, etc. que poblaban el espacio en los edificios civiles, o las tribunas, ciborios, canceles, mesas de altar, retablos, sillerías, rejas, relicarios, frontales de altar, o imagerie diversa que lucían en los edificios religiosos se han perdido o se encuentran en los museos, en el mejor de los casos. No obstante, formaban parte del entorno material y pudieron, en según qué casos, condicionar las características acústicas del edificio.

La información sobre los ornamentos y el mobiliario que poseía un edificio en un determinado momento de su historia no es fácil de obtener ya que, de existir, reside habitualmente en fuentes documentales indirectas tales como inventarios, libros ceremoniales, fuentes iconográficas, etc. Por esta razón, la obtención de este tipo de información requiere un alto grado de especialización en investigación histórica.

Por último, pero no menos importante, la presencia de personas supondría un aporte adicional de absorción sonora que es necesario tener en cuenta. El número de personas que conformaban la audiencia, la posición que ocupaban, incluso la vestimenta que portaban son factores fundamentales para cuantificar el efecto que tendrían sobre la propagación sonora en el recinto.

### 2.3 La perspectiva funcional

El espacio físico no tiene sonido. Al igual que el espacio arquitectónico necesita la luz para ser percibido por la vista, el espacio sonoro necesita energía acústica para revelarse ante nuestros oídos. Las características físicas del espacio solamente establecen sus capacidades (posibilidades) acústicas, pero no hay sonido si no existe un emisor acústico que genera esa energía. En tal caso, el sonido en el recinto es la combinación del estímulo emitido y la reacción acústica del espacio a dicho estímulo. Esta reacción es fuertemente dependiente de las características de emisión de la fuente sonora y de las posiciones del emisor y del receptor.

La funcionalidad también tiene una dimensión espacial. Podríamos definir el *espacio funcional* como la parte del espacio arquitectónico que se utiliza para una actividad en particular. Está delimitado por las posiciones y/o movimientos de las personas que intervienen en esa actividad. En ocasiones el espacio funcional se extiende a lo largo de todo el espacio arquitectónico; en otras, ocupa solo una parte de este. Incluso podría darse el caso de que en espacio arquitectónico coexistan simultáneamente varios espacios funcionales [26].

A su vez, el espacio funcional lleva intrínsecamente asociada una connotación social. Cada persona presente en un evento o ceremonia ocupa una posición física que está relacionada con su estatus social. La ubicación de los asistentes define grupos sociales y establece jerarquías entre ellos. Por ejemplo, el espacio en las iglesias prerrománicas de la península ibérica estaba compartimentado en tres zonas separadas y claramente delimitadas mediante cancelas: el santuario, donde se ubicaba el altar y que era ocupado por el o los celebrantes; el coro que era el lugar ocupado por el clero y podría estar dividido a su vez en dos zonas que separarían a los clérigos en función de su jerarquía eclesiástica; y por último, el aula, que es donde se situaba el pueblo asistente a los actos litúrgicos. La proximidad de cada uno de esos espacios al altar marcaba la jerarquía del colectivo que los ocupaba.

La delimitación social del espacio no es exclusiva del contexto litúrgico, en el ámbito cortesano también se definieron estrictas reglas de protocolo en las que las posiciones de los distintos participantes estaban destinadas a favorecer la actividad política, el ejercicio del poder del rey y la sacralización de su figura. Estas reglas se desarrollaban en diferentes tipos de eventos como bautizos, bodas, lutos, entradas reales, embajadas, juicios, justas, torneos, etc.

Los aspectos funcionales se describen en los libros ceremoniales, tanto litúrgicos como palaciegos, aunque no siempre con el detalle necesario para reconstruir fielmente el entorno funcional del evento en cuestión. Por eso, en ocasiones hay que acudir a fuentes documentales indirectas, tales como la iconografía o las crónicas de la época.

Desde el punto de vista acústico, el uso del espacio define la emisión y la recepción sonora. Con respecto a la emisión sonora, la función fija el tipo de emisor (por lo tanto, sus características de emisión), su posición o su movimiento, así como el estímulo sonoro emitido. Con respecto a la recepción sonora, el uso establece la posición y movimientos de los oyentes. Pero no solo eso, la función también nos da idea de las necesidades de escucha del receptor. Continuando con el ejemplo de las iglesias prerrománicas de la península ibérica, se ha encontrado que poseían zonas acústicamente diferenciadas cuya delimitación coincide con la separación física comentada anteriormente. La zona ocupada por el clero poseía unos valores más bajos de reverberación y una inteligibilidad del habla elevada, lo que permitía a estos oyentes entender perfectamente los textos de los cantos y las oraciones. La zona ocupada por los fieles se caracterizaba por una inteligibilidad más baja, pero suficiente para sus necesidades para el seguimiento del culto, teniendo en cuenta que en general desconocían el latín que era el idioma de la

liturgia. Por otra parte, los valores más altos de reverberación en las naves contribuirían a enfatizar en los feligreses el carácter místico de las actividades litúrgicas del rito hispánico[27].

De la misma manera que lo era en referencia al entorno físico, en el estudio acústico de un recinto histórico es necesario considerar todos estos factores relativos a la funcionalidad de los espacios tal y como se producían en el momento histórico en el que se localiza el estudio, ya que pueden condicionar de una manera importante el campo sonoro en el recinto.

Anteriormente se ha apuntado que el tamaño de la audiencia es un aspecto vital en el comportamiento acústico de un edificio histórico, ya que esta audiencia aporta una cantidad importante de absorción acústica. Aunque se han realizado estudios para cuantificar su influencia en edificios de culto [28], estos estudios asumen el uso del espacio tal y como se concibe en los estándares litúrgicos actuales. El concepto de iglesia-estadio con un único foco sonoro en el altar principal y una audiencia que ocupa una parte significativa del espacio disponible en las naves es un fenómeno relativamente nuevo. En la antigüedad, la asistencia masiva de fieles a los actos religiosos se circunscribía a momentos puntuales como ceremonias de coronación, llegada de nuevas reliquias o la celebración de algún santo particular. En el resto de las ocasiones el espacio funcional ocupaba solamente una parte del espacio arquitectónico. El foco sonoro podría estar ubicado en cualquiera de los múltiples altares y púlpitos que se distribuían a lo largo y ancho de los templos, y la densidad de ocupación podría distar mucho de la que supone la de personas sentadas en bancos tal y como se acostumbra en la actualidad.

Otra cuestión que hay que tener en cuenta a la hora de recrear el ambiente acústico de un edificio en un determinado momento de la historia es hasta qué punto, en un determinado entorno, se podrían estar desarrollando varias actividades simultáneamente, lo que supondría un aumento del número de personas presentes en el entorno con respecto a las que habría en cada actividad individualmente y también la existencia de varios emisores sonoros en puntos diferentes del recinto actuando simultáneamente. Ambos factores incrementarían el ruido de fondo. A pesar de la importancia del ruido de fondo en el paisaje sonoro, en la percepción de los eventos sonoros y en aspectos como la inteligibilidad del habla, son escasos los estudios acústicos de edificios históricos que contemplan este factor. El ruido de fondo para una determinada actividad estaría constituido por el producido de manera indeseada por los asistentes a los eventos o ceremonias y por el sonido producido por otras fuentes sonoras presentes en el entorno. En este sentido es paradigmático el caso de las catedrales, en las que se compaginaban diferentes actividades: la celebración diaria de la Misa Mayor, que ocupaba el altar mayor y el coro, la liturgia de las horas, que se producía ocho veces al día en el coro y los diferentes cultos que tenían lugar en las capillas y altares distribuidos a lo largo del templo, tales como misas privadas, misas conmemorativas, bautismos, matrimonios, misas de difuntos o, incluso, enterramientos. Sirva como ejemplo la catedral de Toledo, en la que está documentado que, en el siglo XVI, se celebraban más de 100 misas diarias entre la salida del sol y el ocaso [29], lo que implica que, necesariamente, se llevasen a cabo varias celebraciones simultáneas en ciertos momentos del día. Con todo esto, el ambiente sonoro de la catedral en la antigüedad distaría mucho del ambiente silencioso en el que se desarrolla la liturgia actual. Este problema no pasó desapercibido en su época; a principios del siglo XIII se dictó en París un estatuto capitular en el que se limitaba el nivel sonoro con el que se deberían celebrar las misas privadas, que debería ser en voz baja, intercambiando los cantos entre el capellán y su acólito [19].

## **2.4 La perspectiva mental**

El principal reto del estudio acústico de un edificio histórico en su faceta de artefacto cultural es comprender cómo las cualidades acústicas del espacio eran percibidas e interpretadas por los oyentes de otras épocas.

En ocasiones, no muy frecuentes, las fuentes escritas reflejan juicios sobre la acústica o el sonido en un determinado entorno, emitidos por personas que los usaron en otro tiempo. La localización y transcripción de estos fragmentos textuales de épocas remotas requiere un análisis de las fuentes documentales referentes al edificio en cuestión, que podría implicar un trabajo de paleografía en el caso

de construcciones muy antiguas. Cuando no se dispone de estos testimonios no cabe otra posibilidad que valerse de la interpretación de los indicadores acústicos objetivos y/o de los juicios subjetivos de oyentes actuales sobre los sonidos producidos en los edificios.

Esto nos lleva a plantear una cuestión importante que es hasta qué punto los indicadores objetivos con los que analizamos las características acústicas de las salas sirven para valorar la percepción subjetiva del sonido. En el estado del conocimiento actual, los parámetros acústicos que medimos habitualmente en los recintos, como por ejemplo los definidos en la norma ISO 3382, no describen adecuadamente la impresión acústica de una sala [30]. Por lo tanto, la única alternativa posible para estudiar los condicionantes perceptuales del sonido en las edificaciones históricas es recrear los sonidos que se producían en los edificios en la antigüedad. Por suerte, las tecnologías de realidad acústica virtual, gracias a la auralización, nos permiten reconstruir el sonido en cualquier espacio con tal que se conozcan las características físicas del mismo y las cuestiones funcionales a las que hemos hecho referencia en capítulos anteriores. Así, los estímulos sonoros obtenidos de los modelos acústicos virtuales podrían emular, en oyentes actuales, las percepciones auditivas en estos espacios en cualquier escenario temporal.

Sin embargo, la mera restitución de los sonidos en los espacios históricos no es suficiente. La experiencia aural es en sí misma una combinación de las percepciones auditivas de los oyentes y de la interpretación cognitiva de dichas percepciones. Mientras las primeras se pueden considerar consistentes a lo largo de los siglos, ya que se basan en aspectos fisiológicos, la interpretación cognitiva de los estímulos percibidos está sujeta a las vicisitudes de las transformaciones intelectuales, culturales, sociales y religiosas de los oyentes a través del tiempo. Somos conscientes de que, aunque seamos capaces de reconstruir los estímulos sonoros que percibieron los oyentes en otras épocas, nos es imposible recrear la experiencia aural de dichos oyentes ya que nuestra experiencia partirá de la perspectiva social, cultural y emocional de un oyente moderno. Para interpretar los registros sonoros históricos y los artefactos arqueológicos que pertenecen a la arquitectura aural de una cultura determinada, necesitamos reconstruir la actitud de esa cultura hacia la percepción aural del espacio, lo cual no es sencillo. La ciencia que estudia este aspecto es la antropología sensorial, una rama de la antropología que se consolidó como disciplina científica en la segunda mitad del siglo XX [31].

En la literatura encontramos algunas propuestas metodológicas específicas para la interpretación cultural de los espacios sonoros del pasado. Por ejemplo, Blesser & Salter [32] proponen la elaboración de narrativas que, basadas en los conocimientos de los que disponemos sobre las culturas del pasado, nos permitan organizar experiencias sensoriales y datos en un supuesto verosímil de interacción del oyente de otra época y el entorno acústico. Se puede obtener una aproximación a esta interacción y, por lo tanto, formular una narrativa si, al menos, somos capaces de identificar las expectativas aurales de los oyentes del pasado utilizando la clasificación de los tipos de escucha realizada por Chion [33]:

- *Escucha casual*: El oyente está obteniendo solamente la sensación de que el sonido existe y la naturaleza del evento sonoro que lo creó.
- *Escucha reducida*: Cuando el oyente está centrado en el propio sonido sin tener en cuenta el significado, contenido, ubicación o evento que lo produce.
- *Escucha semántica*: El oyente está extrayendo información a partir del sonido, como en el habla o la música.

Como ejemplo de estos tres tipos de escucha en un contexto histórico, en una misa pública celebrada en una catedral en la época medieval el clero realizaría una escucha semántica dado que dominaba el idioma de la liturgia, que era el latín; los fieles asistentes realizarían una escucha reducida ya que, en su inmensa mayoría, desconocían el latín, pero estarían centrados en los sonidos producidos; por último, otras personas presentes en el recinto tales como peregrinos, paseantes etc., realizarían una escucha casual puesto que percibirían los sonidos pero no estarían involucrados en la ceremonia litúrgica. Pues bien, la construcción de una narrativa podría consistir en que los oyentes contemporáneos que tengan que juzgar los estímulos sonoros que representan esta situación histórica asuman alguno de estos roles conociendo de antemano la actitud ante el sonido del grupo social al que están representando.



Una dificultad intrínseca a los análisis subjetivos en general es la selectividad de la percepción humana. El proceso cognitivo desarrollado por cada uno de los observadores a la hora de evaluar un estímulo sensorial determinado puede ser muy diferente. Esto, unido a los posibles sesgos cognitivos individuales (capacidad de atención, imprimación, efecto halo, etc.) puede llevar a los participantes en un ensayo subjetivo a resultados perceptuales diferentes del mismo fenómeno. Para evitarlo Weinzierl & Lepa [34] plantean la utilización de métodos de observación estructurada o semiestructurada. Estas técnicas requieren que la pregunta de investigación esté totalmente especificada y que se definan con antelación los fenómenos de interés, de manera que se genere un cuestionario que los participantes en las pruebas tengan que cumplimentar durante el experimento. Los mismos autores proponen la combinación de observaciones estructuradas o semiestructuradas con métodos etnográficos abiertos para incrementar la validez intersubjetiva, mitigando así la delimitación cultural de la percepción.

### 3 Rigor científico y transparencia intelectual

La necesidad de replicar el entorno físico de los edificios históricos en el escenario temporal a que se refiere el estudio y el hecho de que, en la inmensa mayoría de los casos, el estado actual de los edificios y los elementos que contienen difiere del estado en ese escenario temporal, aboca de manera casi irremediable a los investigadores a aplicar métodos de simulación acústica como base de su trabajo. Además, si se quiere abordar la perspectiva mental en la investigación, estos métodos de simulación deben incorporar tecnologías de realidad acústica virtual que permitan recrear los sonidos tal y como se producían en los entornos históricos. Estas tecnologías han experimentado un gran desarrollo técnico en los últimos años y se ha demostrado que pueden producir auralizaciones que representan con precisión los entornos acústicos modelados [35]. Sin embargo, para que estas reconstrucciones sonoras virtuales tengan validez científica no basta con que los sonidos auralizados representen fielmente el comportamiento acústico del modelo, sino que es necesario que dicho modelo esté sustentado por una metodología que garantice el rigor científico de todos los procesos, asunciones y decisiones que se han tomado para generarlo.

Los problemas epistemológicos de la recreación virtual de sonidos del pasado son similares a los que se han detectado en la arqueología en referencia a la visualización computarizada del patrimonio cultural. En los últimos años se ha producido un amplio debate sobre los aspectos que hay que tener en cuenta para garantizar la validez científica de las reconstrucciones virtuales de los entornos históricos mediante gráficos producidos por ordenador, y se han llegado a definir unas directrices metodológicas que, en su mayoría, podrían emplearse también en las aplicaciones de acústica virtual para la reconstrucción del sonido en los edificios históricos. The London Chart [36] es el documento en el que se han plasmado las principales conclusiones en cuanto a la transparencia intelectual de este tipo de representaciones gráficas. Como continuación al anterior, The Seville Principles [37] establece una serie de directrices de aplicación específicas en el ámbito de lo que se ha dado en llamar *arqueología virtual*. En este documento, además de clarificar algunos aspectos referentes a la transparencia intelectual, se incide en los factores que afectan a la calidad de los procesos que se llevan a cabo en el campo de la arqueología virtual.

A continuación, se detallan algunos de las cuestiones importantes que hay que tener en cuenta para garantizar el rigor científico y la transparencia intelectual en los trabajos de recreación virtual de los sonidos en los edificios históricos.

#### 3.1 Rigor histórico

La restauración virtual de los sonidos del pasado en los edificios históricos debe estar fundamentada en un estudio exhaustivo de los entornos físico, funcional y cultural del objeto de estudio desde el punto de vista histórico. Para dicho estudio deben utilizarse todas las fuentes de información científicamente

solventes disponibles, que deberían incluir, no solamente documentos escritos, sino también iconográficos o cualquier otro tipo de elemento que aporte información de interés.

### **3.2 Interdisciplinariedad**

Dependiendo del tipo y el objeto de la investigación, y a tenor de lo que se ha expuesto hasta ahora, el estudio acústico de los edificios históricos como artefactos culturales requiere un trabajo riguroso y científicamente fundamentado en diferentes disciplinas. A la historia y la acústica, que estarán siempre entre los campos científicos involucrados en el proyecto, se pueden unir otros como la arqueología, la paleografía, la iconografía, la musicología, la antropología, la psicología, etc.

Por eso, es imprescindible que este tipo de trabajos se aborde por un equipo multidisciplinar en el que cada uno de los procesos de investigación sea tratado por expertos en los diferentes campos científicos que sean necesarios para responder a la pregunta de investigación.

Tal y como se explicita en The Seville Principles [37], “una verdadera interdisciplinariedad conlleva un intercambio regular y fluido de ideas y puntos de vista entre especialistas de diferentes campos. Un trabajo dividido en compartimentos estancos no puede considerarse interdisciplinar aún cuando trabajen expertos de distintas disciplinas”.

### **3.3 Autenticidad e incertidumbre**

Existe una tendencia generalizada a presentar los trabajos de restauración virtual del patrimonio sonoro como si los resultados obtenidos constituyesen una “verdad histórica”. Nada más lejos de la realidad. Todos y cada uno de los procesos involucrados en este tipo de investigaciones están sujetos a un determinado grado de incertidumbre. Por esta razón es absolutamente necesario que se analice este aspecto y que se documenten, en cada proceso, las imprecisiones, ambigüedades y, muy especialmente, las decisiones tomadas.

Existe una componente de incertidumbre asociada a la validez de las fuentes de información utilizadas, en términos de su exactitud (ubicación, atribución, temporal, lógica), precisión, integridad, consistencia, confiabilidad, credibilidad, validez, subjetividad y linaje de datos [38]. Además, la ausencia de datos que puede darse respecto a algunos de los aspectos involucrados en la investigación también es una componente de incertidumbre perteneciente a esta categoría. Los procesos técnicos de la representación acústica virtual incorporan a su vez componentes de incertidumbre en el modelado, la simulación y en la codificación y la reproducción del material sonoro [34]. También hay que considerar la incertidumbre introducida por el propio observador, que está asociada a la evaluación y la comprensión de los resultados de las auralizaciones por parte de los usuarios. Finalmente, es necesario considerar la incertidumbre introducida por la presentación y diseminación de los resultados de investigación, determinada por factores como el formato de los datos, posibles indeterminaciones en el lenguaje utilizado y su traducción a otros idiomas o la descontextualización. Además de todo lo anterior, existen incertidumbres detrás de cada una de las decisiones tomadas por el equipo de investigación.

Los resultados de investigación deben mostrar claramente el grado de precisión que contienen, indicando los factores de incertidumbre identificados y cuantificándolos cuando esto sea posible. Asimismo, se debe considerar la posibilidad de aportar representaciones sonoras alternativas cuando existan diferentes hipótesis con niveles de confianza parecidos.

Con todo esto, la restauración virtual de los espacios sonoros del pasado no puede constituir una certeza histórica sino una recreación verosímil científicamente fundamentada.

### 3.4 Transparencia intelectual

Toda investigación científica debe ser transparente, lo que implica que todos sus extremos deberían poder ser contrastados por otros investigadores para confirmar o refutar los resultados obtenidos. Para ello es necesario poner al alcance de la comunidad científica información sobre las fuentes en las que se fundamenta la investigación, los datos de partida, los modelos generados, así como “toda la información relativa a las decisiones estimativas, analíticas, interpretativas, y creativas de tal manera que la relación entre fuentes de investigación, conocimientos implícitos, razonamientos explícitos y resultados puedan ser comprendidos” [36].

Desde el punto de vista del observador, los usuarios de las reconstrucciones sonoras virtuales deben disponer de la información necesaria para comprender el objetivo que se persigue en la reconstrucción y lo que significan los sonidos que se producen.

Por otra parte, debido a que toda reconstrucción del pasado supone una nueva contextualización del objeto de estudio, hay que intentar minimizar los posibles sesgos debidos a factores ideológicos, sociales o estéticos.

## 4 Conclusiones

El estudio acústico de los edificios históricos desde una perspectiva global debe incluir tres tipos de enfoques diferentes: la perspectiva física, la perspectiva funcional y la perspectiva mental. Dado que todos los factores relacionados con estas perspectivas van cambiando con el tiempo, el estudio debe circunscribirse a un determinado escenario temporal.

Este tipo de estudios requiere el concurso de varias disciplinas científicas, por lo que se deben abordar de forma interdisciplinar por un equipo de trabajo que incorpore especialistas en todos los campos científicos involucrados.

En cada uno de los procesos de la investigación y en sus aspectos generales se deben respetar los principios de rigor científico y de transparencia intelectual que permitan asegurar la validez de los resultados obtenidos.

## Referencias

- [1] Blesser, B.; Salter, L.R. *Spaces Speak, Are You Listening?: Experiencing Aural Architecture*, MIT Press, Cambridge, 2009.
- [2] Girón, S.; Álvarez-Morales, L.; Zamarreño, T. Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research. *J Sound Vib*, 411, 2017, pp. 378–408.
- [3] Abdou, A.A. Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia, *J Acoust Soc Am*, 113, 2003, pp. 1505–1517.
- [4] Soeta, Y.; Shimokura, R.; Kim, Y.H.; Ohsawa, T.; Ito, K. Measurement of acoustic characteristics of Japanese Buddhist temples in relation to sound source location and direction. *J Acoust Soc Am*, 133, 2013, pp. 2699–2710.
- [5] Tronchin, L.; Farina, A. Acoustics of the Former Teatro -La Fenice- in Venice. *J Audio Eng Soc*, 45, 1997, pp. 1051–1062.
- [6] Katz, B.; Barteld, N.; Poirier-Quinot, D. Virtual reconstructions of the Théâtre de l’Athénée for archeoacoustic study. *Intl Cong Acoust. (ICA)*, Aachen, 2019, pp. 303-310.
- [7] Vassilantonopoulos, S.L.; Mourjopoulos, J.N. A study of ancient Greek and Roman theater acoustics. *Acta Acust United Acust*, 89, 2003, pp. 123–136.

- [8] Bassuet, A. Acoustics of early music spaces from the 11th to 18th century: Rediscovery of the acoustical excellence of medium-sized rooms and new perspectives for modern concert hall design. *J Acoust Soc Am*, 115, 2004, pp. 2582–2582.
- [9] Postma, B.; Dubouilh, S.; Katz, B. An archeoacoustic study of the history of the Palais du Trocadero (1878–1937). *J Acoust Soc Am*, 145, 2019, pp. 2810–2821.
- [10] Zamarreño, T.; Girón, S.; Galindo, M. Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *J Acoust Soc Am*, 121, 2007, pp. 234–250.
- [11] Martellotta, F. A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches. *J Acoust Soc Am*, 125, 2009, pp. 1281–1294.
- [12] Berardi, U.; Cirillo, E.; Martellotta, F. A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *J Acoust Soc Am*, 126, 2009, pp. 1838–1849.
- [13] Martellotta, F. Understanding the acoustics of Papal Basilicas in Rome by means of a coupled-volumes approach. *J Sound Vib*, 382, 2016, pp. 413–427.
- [14] Berardi, U.; Iannace, G.; Trematerra, A. The Acoustics of the Double Elliptical Vault of the Royal Palace of Caserta (Italy). *Buildings*, 7(1), 2017, p. 18.
- [15] Cirillo, E.; Martellotta, F. Acoustics of Apulian-Romanesque Churches: Correlations between Architectural and Acoustic Parameters. *Build Acoust*, 10, 2003, pp. 55–76.
- [16] Desarnaulds, V.; Carvalho, A.P. Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style. *Proc 8th Int. Congr. Sound Vib.*, Hong Kong, 2001, pp. 749–756.
- [17] Patania, F.; Gagliano, A.; Nocera, F.; Galesi, A. Intervention of acoustic correction to improve speech quality of two conference halls in a Sicilian historical building (XVI sec.). *Proc. 38th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. INTERNOISE*, Rostrevor; 2009, pp. 3786–3794.
- [18] Berardi, U.; Iannace, G.; Ianniello, C. Acoustic Intervention in a Cultural Heritage: The Chapel of the Royal Palace in Caserta, Italy. *Buildings* 6(1), 2016.
- [19] Carrero, E. *La catedral habitada: Historia viva de un espacio arquitectónico*. Universitat Autònoma de Barcelona; Barcelona, 2019.
- [20] ISO 3382-1:2009. *Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces*, International Organization for Standardization, 2009.
- [21] Martellotta, F. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J Acoust Soc Am*, 128, 2010, pp. 654–663.
- [22] Vorländer, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; Berlin, 2008.
- [23] Aydin, A.; Tavukcuoglu, A.; Caliskan, M. Assessment of Acoustical Characteristics for Historical Baths (Hammams). *J Acoust Soc Am*, 123, 2008, pp. 3605–3605.
- [24] Ruiz, R.; Díaz-Chyla, A.; Pedrero, A.; Díaz, C. Revestimientos fijos y configurables en la acústica de las catedrales. *VIII Congreso Ibero-americano de Acústica*, Évora, 2012.
- [25] Gül, Z.S.; Çalışkan, M. A Discussion on the Acoustics of Süleymaniye Mosque for Its Original State. *9th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin (MONUBASIN 9)* Ankara, 2014.
- [26] Ruiz, R.; Pedrero, A.; Iglesias, L.; Díaz, C. Horizontes acústicos en la Catedral de Toledo en presencia de varias fuentes sonoras. *45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica*, Murcia, 2014, pp. 1376–1384.
- [27] Pedrero, A.; Díaz, C.; Díaz-Chyla, A.; Navacerrada M.A. La acústica de las iglesias prerrománicas hispanas en su estado primitivo. *46º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica*, Valencia, 2015, pp. 1359–66.
- [28] Alvarez-Morales, L.; Martellotta, F. A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Appl Acoust*, 91, 2015, pp. 47–58.
- [29] González, R.; Ortiz, B.; Pereda, F. *La Catedral de Toledo 1549: según el Dr. Blas Ortiz: descripción gráfica y elegantísima de la S. Iglesia de Toledo*. Madrid: Antonio Pareja Ed., 1999.

- [30] Weinzierl, S.; Vorländer, M. Room Acoustical Parameters as Predictors of Room Acoustical Impression: What Do We Know and What Would We Like to Know? *Acoust Aust*, 43, 2015, pp. 41–48.
- [31] Howes, D. *The varieties of sensory experience: A sourcebook in the anthropology of the senses*. University of Toronto Press, Totonto, 1991.
- [32] Blesser, B.; Salter, L.R. Beyond Measurements: A Multi-disciplinary Framework for Aural Experience of Ancient Spaces. *The Acoustics of Ancient Theaters Conference*, Patras, 2011.
- [33] Chion, M. *L'audio-vision: Son et image au cinéma. 3e édition*. Paris: Armand Colin; 2013.
- [34] Weinzierl, S.; Lepa, S. On the Epistemic Potential of Virtual Realities for the Historical Sciences. A Methodological Framework, in *Augmented Reality. Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation* (Berlin Studies in Knowledge Research 11), edited by J. M. Ariso (De Gruyter), Berlin, 2017, pp. 61–80.
- [35] Postma, B.; Katz B. Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralizations. *J Acoust Soc Am*, 140, 2016, pp. 4326–4337.
- [36] *The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage*, 2009.
- [37] *The Seville Principles. International Principles of Virtual Archaeology*, 2011.
- [38] Schäfer, U.U. Uncertainty Visualization and Digital 3D Modeling in Archaeology. A Brief Introduction. *Int J Digit Art Hist*, 3, 2018.