

ACÚSTICA Y PATRIMONIO

PACS: 43.55.Gx

Teófilo Zamarreño
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC.
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla.
Tel.: +34 954556612; Fax: +34 954557892.
E-mail: teofilo@us.es.

ABSTRACT

In recent years, the growing importance of cultural heritage has come to light, as reflected in recovery programmes which aim to maintain, use and preserve historical legacy, specifically with the enhancement of churches and other places of worship. Acoustic conditions have not always been considered in these programmes, which has caused some resounding functional failures in the rehabilitation of spaces of significant cultural value. Perhaps for this reason, not only have these conditions reached such a high degree of importance, but knowledge into these conditions through the incorporation of an acoustic assessment is also beginning to be seen as a new aspect of the rich heritage of these types of enclosures as opposed to the traditional stylistic-formal perspective. Hence, a contribution towards knowledge and diffusion of acoustic conditions is made by including these aspects into the associated intangible heritage.

RESUMEN

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la creciente importancia del patrimonio cultural, reflejada en los programas de recuperación que pretenden mantener, utilizar y conservar el legado histórico y en concreto con la puesta en valor de iglesias y otros espacios de culto. No siempre las condiciones acústicas han sido consideradas en estos programas, lo que ha provocado algunos rotundos fracasos funcionales en la rehabilitación de espacios significativos. Tal vez por ello, no sólo han pasado a situarse en un plano relevante estas condiciones, sino que su conocimiento empieza a considerarse como una nueva aportación a la riqueza patrimonial del recinto, al incorporar al mismo la valoración acústica, frente a la óptica tradicional estilístico-formal, lo que supone una contribución al conocimiento y difusión al incluir estos aspectos al patrimonio inmaterial asociado.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la creciente importancia de la investigación en Patrimonio Cultural, dentro de una gestión integral y sostenida del mismo, que se refleja no sólo en los programas para su recuperación que pretenden mantener, utilizar y conservar el

legado histórico, sino en considerarla como línea prioritaria de investigación por parte de los responsables de las políticas científicas. Andalucía, por ejemplo, entre las diecisiete Áreas de Desarrollo Sectorial que estableció en 2007 para su Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI), vigentes hasta la fecha, decidió que una de ellas fuese “Protección del Patrimonio Histórico y Cultural” [1].

Este reciente interés se ha ido fraguando en las últimas décadas y se ha traduciendo en diferentes programas y actuaciones a lo largo y ancho de nuestra geografía y de la de nuestro entorno cultural más próximo. Así, a principio de la década de 1980 el Gobierno de España inicia un programa de rehabilitación de teatros de titularidad pública, a través de la Dirección General de Arquitectura, con el fin de actualizar este importante parque patrimonial y ponerlos a disposición de la nueva sociedad. Teatros andaluces como el Falla de Cádiz, el Cervantes de Málaga, el Gran Teatro de Córdoba o el Lópe de Vega de Sevilla formaban parte de la selección de actuaciones que, tras la transferencia de competencias a la Junta de Andalucía, se vio notablemente ampliada para configurar lo que ha sido quizá uno de los proyectos más ambiciosos a nivel nacional en cuanto a la recuperación de nuestro patrimonio teatral: el Programa Andaluz de Rehabilitación de Teatros, en el que se incluyeron más de 35 teatros repartidos por toda la geografía andaluza. Ello ha posibilitado, además de la recuperación y puesta en valor de un notable patrimonio arquitectónico, añadir al mismo un aspecto intangible del mismo: sus comportamiento acústico. En efecto, desde prácticamente los inicios del plan el grupo de Acústica Aplicada del IUACC interviene, contratado por la Consjería de Obras Públicas, como asesores acústicos de todo el programa que se extiende durante un periodo superior a 15 años. Ya se observa aquí la preocupación de la administración por estos aspectos antes a veces olvidados. Ello permitió, además, disponer de una amplia documentación del comportamiento acústico de estos espacios, sin olvidar el carácter social que han jugado en la vida cultural andaluza. Parte de los resultado de este proyecto se recoge en [2] y en la Figura 1 se muestran imágenes de algunos de los teatros rehabilitados.

Este trabajo tuvo su continuación en un proyecto coordinado con las universidades Politécnica de Valencia, Pública de Navarra y Politécnica de Barcelona, financiado por el Plan Nacional de I+D+i. En esta ocasión se realiza una selección de espacios para, además de describir el campo acústico en su interior mediante el registro de las respuestas al impulso (RI) mono y binaurales, recopilar información subjetiva de la respuesta de los oyentes para intentar buscar su correlación con los parámetros físicos [3], trabajo pionero en nuestro ámbito cultural. Es evidente que las condiciones acústicas, en este tipo de recintos, resultan de la máxima importancia desde el punto de vista funcional y parece absolutamente necesario que sean

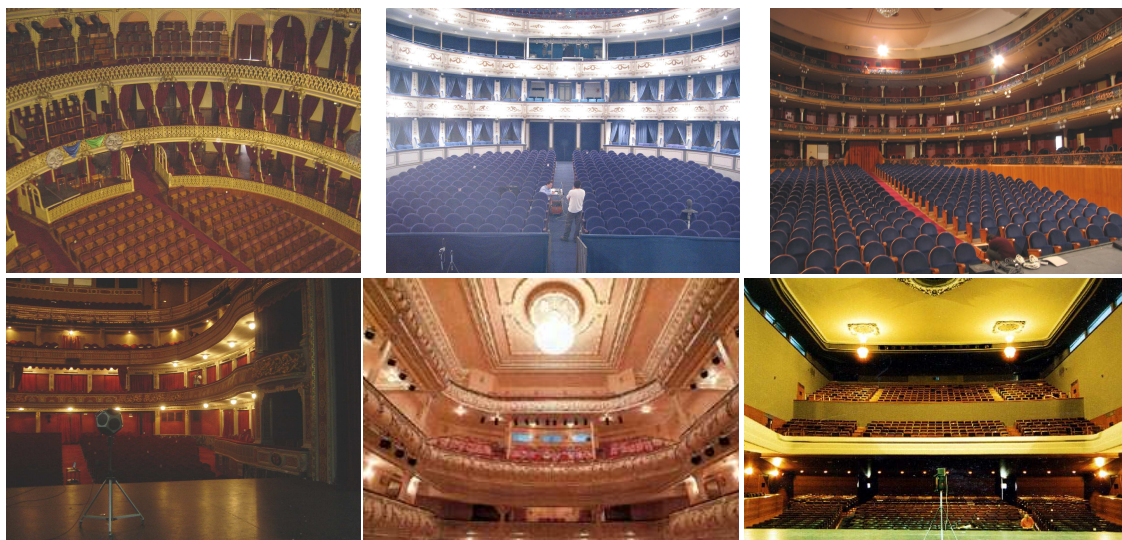


Figura 1. Vista interior de teatros pertenecientes al patrimonio andaluz rehabilitados en el marco del Plan de Rehabilitación Estatal y/o Autonómico. De izquierda a derecha, Falla de Cádiz, Cervantes de Málaga, Gran Teatro de Córdoba, arriba, y Lope de Vega de Sevilla, Gran Teatro de Huelva y Villamarta de Jerez, abajo.

contempladas en los procesos de rehabilitación y recuperación de estos espacios utilizando las más modernas tecnologías. Por ello, como sugiere Bradley [4], conviene establecer relaciones entre los atributos perceptivos y los parámetros acústicos, así como encontrar criterios de diseño que faciliten a los arquitectos, tanto las intervenciones en edificios de nuestro patrimonio existente como en los proyectos de nueva planta, la optimización de su calidad acústica.

En nuestro entorno cultural se han desarrollado otros proyectos en los que los aspectos acústicos se han incorporado a los estéticos y visuales para ampliar el concepto de patrimonio, permitiendo así ampliar el contenido patrimonial de estos elementos con aspectos relacionados con lo que se ha devenido en denominar "patrimonio inmaterial". Uno de ellos tiene que ver con los teatros antiguos clásicos, financiado por la Comisión Europea (Fifth Framework INCO-MED Programme), bajo la denominación ERATO (identification Evaluation and Revival of the Acoustical heritage of ancient Theatres and Odeon), se desarrolla entre 2003 y 2006. Una de las prioridades planteadas es preservar y utilizar el patrimonio cultural. En concreto, según podemos leer en la página web del proyecto [5], "los objetivos principales de la investigación son la identificación, restauración visual y recreación del patrimonio acústico en unos cuantos ejemplos de teatros (espacios abiertos esencialmente dedicados para representaciones habladas) y odeones con techo (espacios cubiertos dedicados al canto y la música) en un entorno virtual 3D". La recreación virtual pretendía integrar las simulaciones visuales y acústicas y se basaba en los resultados de investigación más recientes en arqueología, historia teatral, vestimentas, actuaciones teatrales y música antigua. Los objetivos científicos y tecnológicos los resumen así:

- Identificación de las características de los teatros y odeones clásicos.
- Identificación y selección de instrumentos musicales, música, sonidos, ropas y estilos de interpretación de los periodos Helénico y Romano.
- Creación de la restauración virtual y recreación del patrimonio cultural.
- Evaluación del patrimonio acústico en las restauraciones virtuales.
- Comparación del patrimonio acústico en el teatro griego, el romano y en el odeón.
- Proporcionar información para futuros trabajos de restauración de los teatros clásicos.
- Proporcionar directrices para modernos usos de los teatros clásicos.

Como podemos deducir a partir de los objetivos enunciados, se hace absolutamente necesario constituir un equipo multidisciplinar para abordarlo con posibilidades de éxito. También merece la pena destacar el hecho de que se pretende *transferir el conocimiento* generado no sólo al ámbito científico y técnico, sino a toda la sociedad, como se pone de manifiesto en los dos últimos objetivos. Es posible consultar los centros participantes en la web del proyecto, además de otra información de interés relacionada con el mismo y la difusión de sus resultados.

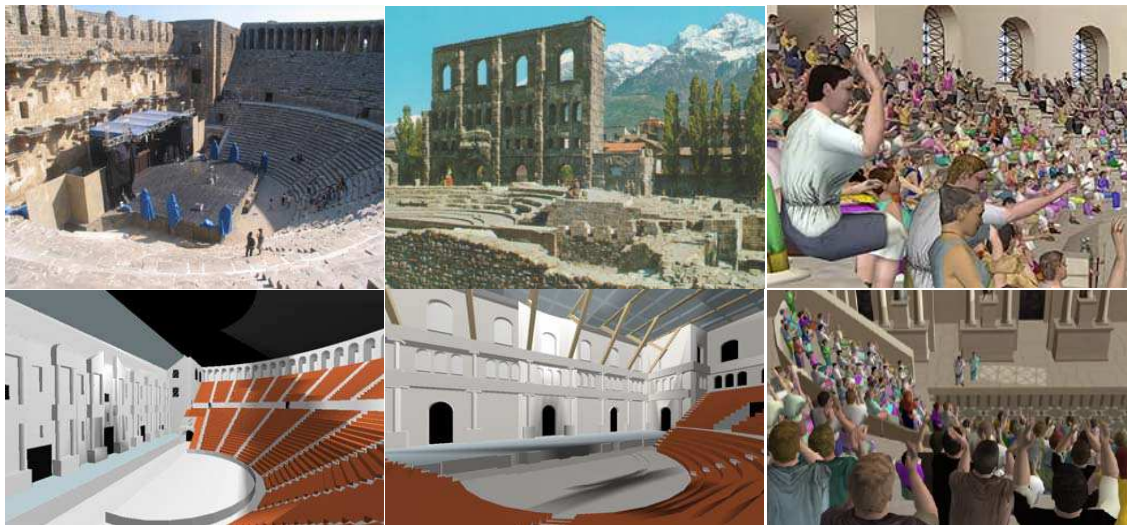


Figura 2. Estado actual (arriba) y modelos elaborados en el marco de ERATO (abajo) del teatro de Aspendos (izquierda) y del odeón de Aosta (centro). A la derecha fotogramas de las recreaciones acústico-visuales del proyecto.

También financiado por la Comisión Europea, dentro del Programa Europeo INCO (Cooperación en ciencia y tecnología con países de Europa Central y Oriental, dentro del V Programa Marco Europeo de Investigación), se había desarrollado previamente el proyecto CAHRISMA (Conservation of the Acoustical Heritage by the Revival and Identification of the Sinan's Mosques' Acoustics") [6,7,8], con pretensiones similares en cuanto a sus objetivos, pero ahora centrado en el caso de recintos de culto: las mezquitas que el arquitecto Sinan contruyó en Turkía (Figura 3). En concreto pretendía innovar el concepto de "*patrimonio arquitectónico híbrido*" en espacios acústicamente significativos, como una nueva forma de identificación, que recoge las características acústicas además de las peculiaridades visuales y formales.

El resto del trabajo se desarrollará en torno a las tareas realizadas por el grupo de Acústica Aplicada del IUACC en este contexto pluridisciplinar acústica-patrimonio y poniendo el foco sobre los espacios de culto. La razón no es casual, es indudable el papel que la Religión ha tenido en el desarrollo, organización y evolución de los pueblos. La Arquitectura no ha sido una excepción, como pone de manifiesto la abundancia y prevalencia de los edificios religiosos sobre los civiles en las ciudades europeas: las mezquitas musulmanas, las iglesias bizantinas, las sinagogas judías y, sobre todo, las grandes catedrales cristianas, por mencionar algunas de las religiones que, en algún momento de la historia, se han desarrollado y han dejado en ellas su huella.

ACÚSTICA Y PATRIMONIO EN LOS ESPACIOS DE CULTO

El templo cristiano se configura a lo largo de la historia como resultado de cómo esa religión entiende la liturgia y el espacio de culto. En la evolución del tipo eclesial y de cómo se ocupa el espacio interior de las iglesias resaltamos la importancia de dos períodos: el Gótico y el Barroco [9, 10]. El cambio del románico al gótico supone un cambio dirigido a la vida urbana, al nacimiento de las universidades y de las grandes catedrales. La catedral no sólo era el lugar donde se celebraba el culto litúrgico, sino también un lugar de fiesta, de conmemoración, de celebración, de representación de dramas, e incluso de reunión de los gremios y de las corporaciones locales. También fue el lugar de la música que auspició, por ejemplo, la evolución de la monodía a la polifonía. Para muchos investigadores, la arquitectura de las catedrales góticas fue clave en esa evolución, asumiendo la catedral de Nôtre Dame de París la dirección de ese cambio [11]. Así mismo tuvieron su importancia para el desarrollo de la música coral e instrumental; y en este sentido es bien conocida la contribución de la Basílica de San Marcos de Venecia a esa evolución. Sus famosos coros divididos fueron una contribución fundamental en la Historia de la Música. Desde el punto de vista litúrgico, el período histórico en el que más se atendió al problema acústico en las iglesias fue la segunda mitad del siglo XVI, como consecuencia de las determinaciones del concilio de Trento, y por la importancia que éste concedió a la predicación como instrumento al servicio de la Contrarreforma. En el Barroco y tardo-Barroco europeos las iglesias fueron escenario de notables actuaciones musicales de los mejores compositores de su tiempo. Aún hoy esas iglesias son consideradas el marco ideal, tanto óptico como acústico, para la interpretación de la música barroca. La Historia de la Arquitectura es rica en alusiones a montajes efímeros realizados en los grandes templos (tapices, colgaduras, tribunas, etc.), principalmente a partir de la



Figura 3. J. H. Rindel y su equipo en una sesión de medida en Hagia Sophia y modelo de la mezquita Süleymaniye elaborado en el marco del proyecto CAHRISMA, ambas de Estambul.

segunda mitad del siglo XVI, alcanzando su máximo esplendor en los dos siglos barrocos, XVII y XVIII, para las magnas celebraciones religiosas e incluso civiles, festivas o luctuosas [12,13]. Dichos montajes aumentaban notablemente la absorción sonora en las iglesias y catedrales, a lo que contribuía también la gran asistencia de público que, en muchos casos, se mantenía de pie pues los bancos en las iglesias los introdujo el protestantismo, con servicios litúrgicos largos, y, posteriormente, los incorporaría la iglesia católica [9].

A pesar de que si atendemos al concepto originario de iglesia, generalizable a los demás lugares de culto, como lugar de reunión de fieles dispuestos a escuchar la palabra de Dios, pronunciada por el celebrante, las condiciones acústicas deberían jugar un papel primordial para cumplir su función, generalmente éstas han quedado relegadas a un papel secundario, cuando no ignoradas, frente a criterios artísticos o arquitectónico-formales relacionados con la liturgia. Este hecho es algo común a todas las confesiones religiosas. Hay que tener en cuenta, además, que hasta que empiezan a surgir los auditorios, en el mundo occidental las iglesias ocupan el puesto más destacado, entre los diferentes modelos de edificios, como lugar que ve nacer y acoge, temporalmente, a la música. Durante muchos siglos, la producción musical de occidente fue concebida para ser interpretada y oída en las iglesias. Merece, al respecto, especial mención la adaptación de una iglesia gótico-tardía al rito luterano: la Thomaskirche, en Leipzig, de la que fue maestro de capilla J. S. Bach, y donde tenían lugar tanto misas en latín como cantatas germánicas. Para esta iglesia Bach compuso gran parte de su obra coral y dos de sus obras maestras religiosas: La Pasión según San Mateo y Misa en si Menor [9].

Esta aparente despreocupación por las condiciones acústicas de los espacios de culto ha cambiado drásticamente en las últimas décadas. La profundización en el conocimiento de los aspectos de nuestro patrimonio arquitectónico, ha dado lugar a una profusa labor en lo que se refiere al estudio y conocimiento de la acústica de espacios existentes, a veces rehabilitados o reutilizados con fines culturales. En este contexto, las administraciones públicas, en el marco de los programas de conservación y recuperación del patrimonio, han acometido en múltiples ocasiones proyectos de rehabilitación de espacios eclesiales con nuevos usos o compartidos con el uso religioso. Esto ha tenido también su reflejo en el mundo científico con la aparición, en los congresos internacionales de acústica, de sesiones especializadas dedicadas a Worship Building Acoustics, por ejemplo en el Forum Acusticum Sevilla-2002, y la abundante producción de artículos sobre la acústica de lugares de culto para las revistas especializadas.

Las primeras aportaciones sistemáticas en este campo, se inician a partir de la década de 1970. Aunque, antes de esa fecha, cabe destacar las medidas llevadas a cabo por Raes et al. [14] en dos basílicas romanas, el análisis realizado por Lottermoser [15] de diferentes iglesias barrocas luteranas alemanas y el estudio que Keibs y Kuhl [16] hacen de la ya citada Thomaskirche de Leipzig. En la década citada, y relacionados con la reverberación, son reseñables los trabajos de Shankland et al. [17] en basílicas romanas, en los que analiza el acoplamiento acústico entre los diferentes volúmenes que configuran cada templo y el carácter difuso del campo acústico; los de Tzekakis [18,19] que, con planteamientos parecidos, estudia el comportamiento de algunas iglesias ortodoxas en Tesalónica, y los de Fearn [20] sobre iglesias españolas (catalanas), inglesas y francesas, en las que mide los tiempos de reverberación y compara los resultados con el diseño arquitectónico, poniendo de manifiesto que, en general, se sobrepasan los valores recomendados, tanto para la palabra como para la música. Más recientemente, Fernández et al. [21] inician una base de datos con los resultados de una muestra de 14 iglesias españolas, de diferentes estilos arquitectónicos, y discuten la adecuación de los valores de los tiempos de reverberación a los recomendados.

Estudios más avanzados se ocupan, además del tiempo de reverberación, de los niveles de presión sonora y de la inteligibilidad. Destacamos entre ellos los múltiples trabajos relacionados con la catedral de San Pablo de Londres [22,23,24,25,26] y los de Carvalho, que hace un extenso estudio de un gran número de iglesias portuguesas [27,28,29], en el que, además del tiempo de reverberación, incorpora la claridad, la fuerza acústica y el índice RASTI para valorar la inteligibilidad. Los estudios más recientes y sistemáticos, incorporan los parámetros acústicos más habituales para la acústica de salas, poniéndolos en relación con las

características arquitectónicas y con el uso al que se destinan. Tal es el caso de diez iglesias de Génova (s. XI-XIV), con algunas connotaciones tipológicas comunes, estudiadas por Magrini et al. [30], quienes, mediante análisis estadístico de energía, estudian los espacios acoplados, comparan los resultados teóricos con los datos experimentales [31] y discuten la distribución de los valores de los parámetros acústicos medidos y teóricos [32,33].

De especial interés son los estudios orientados sobre tipologías eclesiales determinadas con diferentes enfoques. Entre ellos citamos la recopilación de Desarnaulds et al. [34], de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas, tanto católicas como protestantes, en las que se presta especial atención al tiempo de reverberación y al índice RASTI. Uno de los estudios recientes más significativos es el de Cirillo et al. [35,36], en el que se ocupan del comportamiento acústico de un conjunto de iglesias románicas del sur de Italia. Los resultados experimentales permiten analizar la distribución espacial de los mismos en el interior de cada iglesia y su análisis global. El estudio detallado de los datos anteriores les permite ofrecer conclusiones de la influencia de la arquitectura de esas iglesias románicas sobre el tiempo de reverberación; establecer correlaciones entre los valores, espacialmente promediados, de los demás parámetros acústicos con el tiempo de reverberación; expresar los parámetros monoaurales en función de la distancia emisor-receptor y poner de manifiesto que los que describen la claridad están correlacionados entre sí. Así mismo, midieron y analizaron parámetros binaurales [37] (IACC). Los análisis anteriores y el comportamiento experimental observado de la energía inicial y final en función de la distancia al emisor, les llevan a proponer un modelo teórico [38], para predecir los parámetros energéticos en estas iglesias. Finalmente, han refinado el modelo teórico para hacerlo más fiable, físicamente más aceptable y ampliar su campo de predicción a otros tipos de iglesias [39,40]. Estos dos últimos trabajos suponen tal vez uno de los más serios intentos de describir de forma analítica el comportamiento acústico de los recintos eclesiales. Así mismo, han realizado una propuesta metodológica específica para la realización de medidas acústicas en los espacios de culto [41] y han publicado una monografía sobre el tema [42], en la que presentan datos acústicos de recintos de culto de diferentes épocas y tipologías. Sus últimos trabajos se han orientado al estudio de los espacios acoplados en la basílica de S. Pedro de Roma [43], la evaluación de la absorción de la zona de audiencia en los lugares de culto [44], y la relación entre parámetros objetivos y sensación percibida en estos espacios [45,46].

Recientemente se han empezado a aplicar las técnicas de trazado de rayos para el estudio del campo acústico en los espacios de culto. Por no hacer prolija esta descripción nos remitimos al proyecto CAHRISMA [6,7] o lo realizado por nuestro grupo en las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla [47,48]; en especial, una exhaustiva comparación de resultados medidos y simulados en seis de las iglesias gótico-mudéjares estudiadas [49] y que se presentarán más adelante.

El grupo de investigación de Acústica Aplicada del IUACC tiene un claro carácter interdisciplinar, pues está integrado por físicos y arquitectos, y desde la década de los 80, ha mostrado gran interés por las condiciones acústicas de los recintos de culto. Primero desde un punto de vista más profesional, trasladando nuestra experiencia de la acústica de teatros y salas de conciertos (referida en la introducción), como cuando se realizó el acondicionamiento acústico de la iglesia renacentista del Hospital de las Cinco Llagas, de Hernán Ruiz [50], para salón de plenos del Parlamento de Andalucía, y más tarde, en la década de los 90 hasta la actualidad, con un trabajo de claro carácter científico que ha dado lugar a publicaciones de reconocimiento nacional e internacional [10,51,52,53,54,55,56], que han sido de indudable interés para seguir abordando proyectos de acondicionamiento acústico de iglesias (Iglesia-Teatro del Carmen de Vélez-Málaga, Iglesia-Auditorio de San Francisco de Baeza, Iglesia-Auditorio de la Compañía de Jesús de Jerez de la Frontera, etc). Acústica y Patrimonio Cultural, entrelazadas, son pues las dos principales líneas de investigación de este equipo.

Los estudios realizados por el grupo incluyen una descripción del campo sonoro mediante los principales parámetros de acústica de salas propuestos para tipologías teatrales o de auditorios, pero a veces poco ajustados a los tipos eclesiales. Como consecuencia de las primeras investigaciones sobre el tema, el equipo propuso un primer modelo analítico de la

energía acústica [57], basado en el modelo de Barron-Lee [58] para auditorios, que resultó eficaz al tratar la distribución espacial de la fuerza sonora, pero no daba cuenta del comportamiento del resto de relaciones energéticas. A raíz de un trabajo de investigación del grupo [59], se desarrolla la tesis doctoral de Galindo [60] en torno a las iglesias Gótico-Mudéjares de la ciudad de Sevilla, centrando así la atención sobre una tipología común y realizando un estudio muy pormenorizado de cada recinto y del conjunto como entidad global. Fruto de todo ello, se han publicado numerosos trabajos en revistas internacionales [49,61,62,63,64,65,66]. Especial mención merece el artículo de Zamarreño et al. [66] sobre el modelo energético de estos espacio singulares (modelo μ), que mejoraba al anteriormente propuesto [57], consiguiendo ampliar su validez para describir el comportamiento del resto de parámetros basados en relaciones energéticas. Además, sin merma significativa en su validez, mejora en simplicidad al propuesto por Cirillo et al. [38,39,40]. En dicho artículo se propone que el modelo podrá aplicarse a otras tipologías eclesiales y ello ha sido confirmado, al ser aplicado y contrastado [67,68] por el equipo de Cirillo y Martellota a los espacios que ellos han analizado. Además, ha sido una constante en las investigaciones del grupo sobre acústica de iglesias la preocupación por los aspectos históricos y patrimoniales [9,50,51,52,53,54,55,].

En estos momentos se está iniciando un nuevo proyecto, financiado por el Plan Nacional de I+D+i, que se centra en la acústica de las grandes catedrales cristianas andaluzas y que comparte objetivos con otros similares de diferentes confesiones religiosas. Las mezquitas son el objeto de estudio de CAHRISMA [6,7], ya citado, y otros trabajos de investigación [69,70]; en 1990 Hammad [71] publica un amplio estudio en el que se analizan las características de 30 mezquitas de Amman, poniendo de manifiesto las deficiencias acústicas de la mayoría; posteriormente se rehabilitó una de ellas y se publicaron los resultados alcanzados [72] y Adel [73] ha publicado un amplio análisis sobre el comportamiento acústico de las mezquitas en Arabia Saudita. La mayoría de estos trabajos, cualquiera que sea la tipología del templo acorde con la confesión religiosa, tratan el conocimiento de las condiciones acústicas de esos espacios de culto partiendo de mediciones in situ, y el posterior análisis de las relaciones entre las características arquitectónicas y las acústicas, pero falta una visión global que aporte a la problemática acústica, soluciones y medidas correctoras para la obtención de la calidad sonora que se demanda a estos espacios de culto, compatibles y respetuosas con los valores patrimoniales de los edificios. Ya se han realizado varios trabajos en esta línea, como el abordado en la tesis doctoral de R. Suárez [74], que dio lugar a varias publicaciones en revistas de reconocimiento internacional, tanto de acústica [54] como de patrimonio cultural [55]. Nos ocuparemos con más detalle de este proyecto al final de esta comunicación.

ACÚSTICA Y REHABILITACIÓN DEL PATRIMONIO DESDE EL IUACC

Como ya se ha puesto de manifiesto, la tradicional aparente despreocupación por las condiciones acústicas de los espacios de culto ha cambiado drásticamente en las últimas décadas. La preocupación por el conocimiento, conservación y puesta en valor de nuestro patrimonio arquitectónico ha dado lugar a una profusa labor en lo que se refiere al estudio e investigación de la acústica de espacios existentes, a veces rehabilitados o reutilizados con fines culturales en el marco de los programas de conservación y recuperación del patrimonio abordados por las administraciones públicas. Ello facilita la conservación, restauración y puesta en valor de los objetos patrimoniales para su trascendencia temporal para futuras generaciones. Es por tanto de vital importancia que, al acometer estos procesos la funcionalidad del espacio intervenido no quede comprometida, pues ello puede llevar al abandono de su uso y consecuente deterioro, por lo que habrán sido baldíos los esfuerzos empleados en su rehabilitación. En este sentido las condiciones acústicas no son una cuestión menor como se pondrá de manifiesto con los dos casos que se presentan a continuación. Es más, considerada la perspectiva acústica, es posible a veces, sugerir e implementar nuevos usos o funciones que revaloricen el espacio rehabilitado. Se observará que si se tienen en cuenta las condiciones acústicas en el proceso de rehabilitación desde las primeras fases del proyecto, las soluciones correspondientes pueden ser integradas en el mismo; sin embargo, si se obvian, su corrección a posteriori, si es posible, será mucho más complicado. En cualquier caso es el arquitecto el

profesional capacitado para esa integración y ha de ser él, en permanente diálogo con el consultor especialista, el que adopte e integre las soluciones de adecuación acústica en el contexto global del proyecto.

La Iglesia del Hospital de las Cinco Llagas de Sevilla

Tras varias décadas de abandono después del cese de la actividad hospitalaria, con el advenimiento de la democracia y la asunción de las competencias por parte de las autonomías, la Junta de Andalucía aborda uno de los mayores proyectos de rehabilitación de un edificio patrimonial que se ha llevado a cabo en las últimas décadas, con el fin de adecuarlo como sede del Parlamento Andaluz. El Hospital de las Cinco Llagas de Sevilla es un magnífico ejemplo de arquitectura civil renacentista, diseñado por el arquitecto Hernán Ruíz, organizado en torno a 8 patios (Figura 4) que se articulan en torno a la iglesia, hoy salón de plenos, que ocupa una superficie de unos 27000 m². La iglesia tiene planta de cruz latina con pequeñas capillas laterales (Figura 5 y Figura 6) y se cubre con bóveda de piedra que descansa sobre pilastras y muros del mismo material (Figura 6). Tiene un volumen de unos 12000 m³, una superficie interior de 6000 m², con una altura media de 20 m y un área de audiencia de 450 m² que alojará a unas 300 personas como máximo. Estos valores arrojan las siguientes relaciones: 40 m³/persona (frente a los 5-7 deseables para la función asignada); una baja, aunque no desmesurada, densidad de ocupación de 1.5 personas/m², y una elevada relación volumen/área de audiencia (26 m frente a los 8 recomendables).

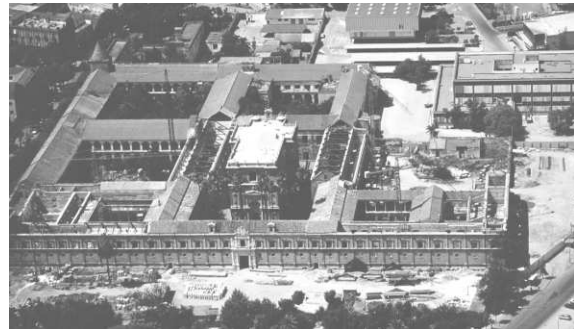


Figura 4. El Hospital de las Cinco Llagas antes de su rehabilitación con la iglesia en el patio central.

El proyecto de rehabilitación, en su primera fase, que es la que incluye la iglesia, fue redactado y dirigido en su ejecución por los arquitectos Alfonso Jiménez y Pedro Rodríguez. Desde el primer momento se plantearon la necesidad de la colaboración para compatibilizar las condiciones acústicas con el resto de exigencias formales y funcionales a las que había que dar respuesta en el proceso de intervención, especialmente en el caso de la iglesia que se pretendía que albergara el salón de plenos. Esta actitud permitió medir los índices acústicos más significativos, incluso en el estado inicial, lo que resultó de suma utilidad a la hora de

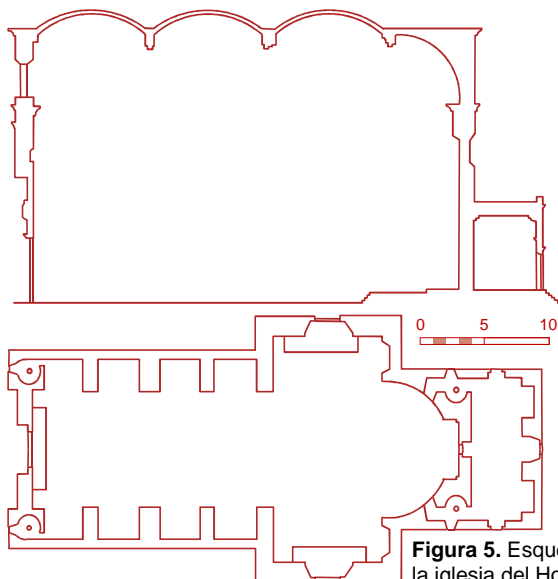


Figura 5. Esquemas de la planta y sección de la iglesia del Hospital de las Cinco Llagas.



Figura 6. Interior de la iglesia del H. de las Cinco Llagas (izquierda) y detalle de una capilla (derecha) antes de la rehabilitación.

tomar decisiones.

En la Figura 7 se puede observar la variación del tiempo de reverberación (est. previo), medido y promediado espacialmente en los puntos indicados en la Figura 8, frente a la frecuencia (en banda de 1/3 de octava) antes de la rehabilitación, con valores elevados a bajas y medias frecuencias. La rápida caída a medida que crece la frecuencia tiene que ver con la absorción del aire y con el hecho de que el recinto presentaba la mayoría de sus huecos (ventanas y puertas) sin ningún cerramiento, por lo que de haber estado éstos tapados los valores habrían sido aún mayores. Así mismo se ha señalado la banda en la que sería deseable se situaran estos valores tras la rehabilitación (óptimo S.A.E., sin apoyo electroacústico, y óptimo C.A.E., con él).

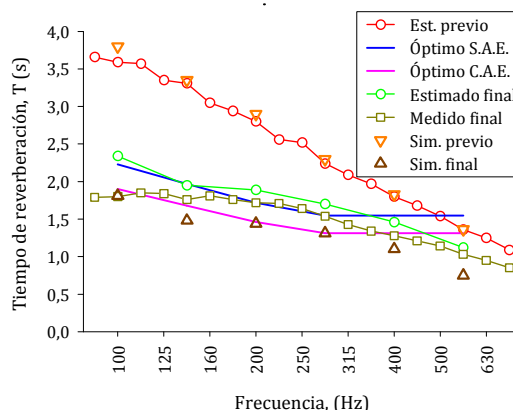


Figura 7. Tiempo de reverberación, en función de la frecuencia, para diferentes situaciones, y valores deseados propuestos.

Se realizaron medidas del ruido de fondo en el entorno, dado que la zona tenía una alta densidad de tráfico pesado. A nivel de acera, en la calle más ruidosa, frente a la fachada principal, se midieron valores comprendidos entre 74 y 82 dBA en los momentos de máxima afección. Estos valores caían hasta los 42-45 dBA medidos en el interior del patio donde se ubica la iglesia, y hasta los 32-34 dBA dentro de la misma, aún con la falta de protección en los huecos ya mencionada. Por tanto, el ruido exterior no debería ser un problema tras la rehabilitación.

A falta de la instrumentación adecuada para realizar medidas objetivas, se realizaron ensayos subjetivos de inteligibilidad mediante la técnica de percepción de "logatomos". Los resultados de los mismos se resumen en la Figura 8 sobre la planta de la iglesia. Junto a cada punto de recepción se pueden encontrar los porcentajes promedio de aciertos (en rojo) y, debajo, el nivel acústico medio medido en cada posición durante los ensayos (en azul). Se observa que el nivel acústico cae desde unos 60 dBA, en la zona del crucero, hasta los 54, a los pies de la nave; mientras que el porcentaje de logatomos correctamente entendidos lo hace desde valores en torno al 70% hasta el 52%. Poco antes del inicio de las obras se tuvo la ocasión de medir el índice RASTI en los puntos situados en el eje de la iglesia; los resultados se muestran en la Figura 9 y se observa cómo los valores en la zona de la nave se mantienen en la zona de calificación "pobre" ("Po" en el eje vertical de la derecha). Los receptores 10 y 11 se situaron en el triforio ante la posibilidad, luego descartada por razones de accesibilidad, de alojar público en él,

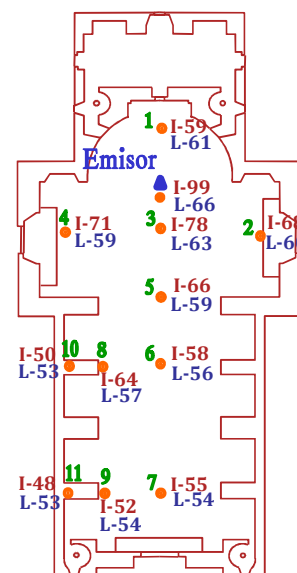


Figura 8. Planta de la iglesia del H. de las Cinco Llagas con los puntos de medida. En rojo, valor de la inteligibilidad subjetiva, y en azul, el del nivel sonoro, en cada uno de ellos.

Ante la práctica imposibilidad de actuar sobre el volumen por decisión de los arquitectos, dado el carácter patrimonial del recinto, para reducir el tiempo de reverberación, se ha de aumentar la absorción en el interior, sobre todo a bajas y medias frecuencias. De acuerdo con ellos, se decidió la colocación de absorbentes tipo membrana y resonadores de Helmholtz acoplados, elaborados a base de paneles perforados. Así mismo el suelo se cubrió con una gruesa moqueta. En la Figura 10 se muestra la colocación, en el interior de la iglesia, de los "muebles acústicos" que los arquitectos diseñaron para soportar los paneles absorbentes, utilizados unas veces para ocultar los

conductos de climatización (caso de las capillas), las instalaciones auxiliares de iluminación (sobre el triforio), los dobles cancelos de las puertas de acceso (en los brazos transversales de la cruz, no mostrados), o incluso formando parte del mobiliario de uso: es el caso de los frentes ranurados de los pupitres de los parlamentarios.

Las características de los paneles (perforados y sin perforar) se predimensionaron mediante las fórmulas empíricas al uso, de forma que las respectivas frecuencias de resonancia cubrieran el rango 125-500 Hz. El resultado fue sugerir la utilización de paneles con espesores entre 3 y 5 mm y densidad de perforación entre el 10 y el 20%, con diámetros de 3, 5 y 8 mm al menos, que fueron ejecutados en obra. Se decidió una distribución lo más aleatoria posible de cada tipo de panel con el fin de obtener una distribución adecuada de la absorción. Como las mayores exigencias estaban en la zona de bajas frecuencias, el 50% del área a tratar se cubrió con paneles sin perforar. La terminación final de los mismos se realizó con una espuma de tapicero de 5 mm y la tela de terciopelo rojo que se aprecia en la Figura 10(b) y (c). El esquema de montaje de estos paneles se muestra en la Figura 11, donde el espesor del material poroso es de 5 cm y la cámara de aire (determinada por razones no acústicas) es de unos 20 cm. Se realizaron ensayos de absorción para incidencia normal, para todas las muestras susceptibles de ello, en el tubo de ondas estacionarias y se estimaron analíticamente los valores esperados para incidencia aleatoria, con el fin de utilizarlos para estimar el tiempo de reverberación final esperado. En la Figura 12 aparecen los resultados para el coeficiente de absorción de la muestra con perforaciones de 5 mm de diámetro. Aunque algunas ubicaciones venían predeterminadas por otras exigencias (el caso de los muebles de las capillas para cubrir los conductos de climatización) en otros casos el estudio de rayos y la existencia de paños lisos y duros (por encima del triforio) en nave y crucero, determinaron el lugar más efectivo de colocación. En total se trataron 600 m².

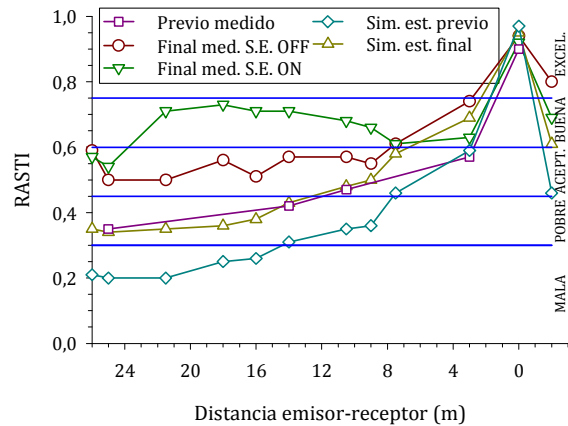


Figura 9. Índice RASTI frente a la distancia al emisor; medido (estado previo y final con y sin apoyo electroacústico) y simulado (sin apoyo electroacústico).

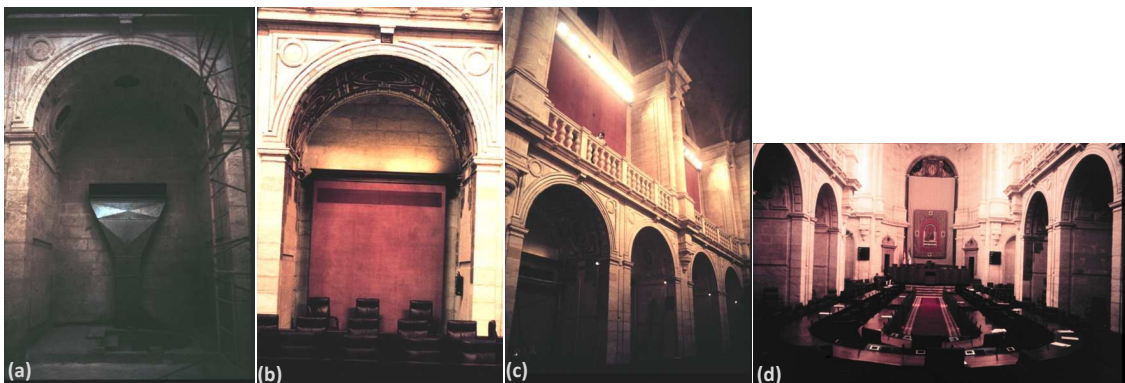


Figura 10. Interior de la iglesia del H. de las Cinco Llagas: (a) capilla lateral con el conducto de aire acondicionado, (b) la misma capilla con el mueble acústico instalado, (c) mueble acústico en el triforio para soportar las luminarias y (d) vista de la zona de los pupitres de los parlamentarios.

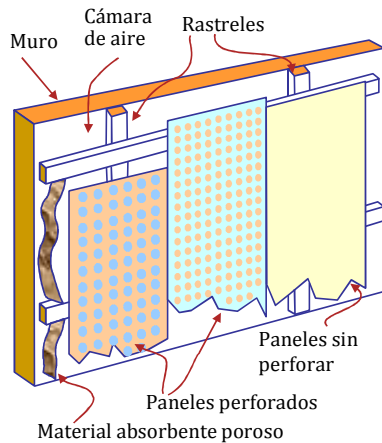


Figura 11. Esquema del montaje de los paneles acústicos, en la iglesia del H. de las Cinco Llagas.

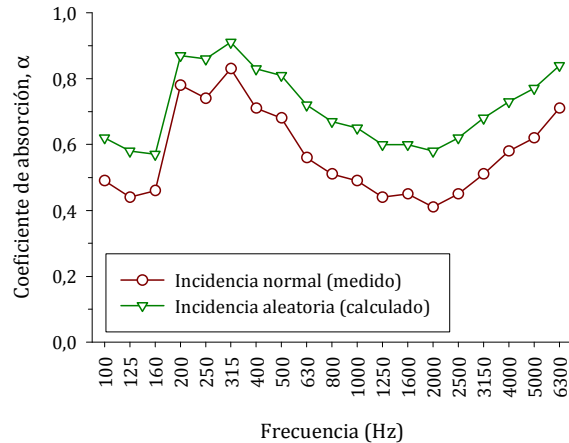


Figura 12. Coeficiente de absorción, medido para incidencia normal y estimado para incidencia aleatoria, de los paneles con perforaciones de 5 mm de diámetro.

En cuanto al ruido de fondo en el interior, se fijó como objetivo alcanzar una valoración, en términos de las curvas NC, igual o inferior a 30. Como ya habíamos comprobado en la fase previa que el ruido del tráfico externo no supondría un problema, se fijó la atención en la protección frente a los ruidos internos generados por la propia actividad en el edificio o las diversas instalaciones. En consecuencia, se diseñaron cancelas acústicas en las entradas, colocados tras las puertas originales, y se cuidó especialmente la instalación de climatización para reducir su impacto acústico dentro del edificio: sala

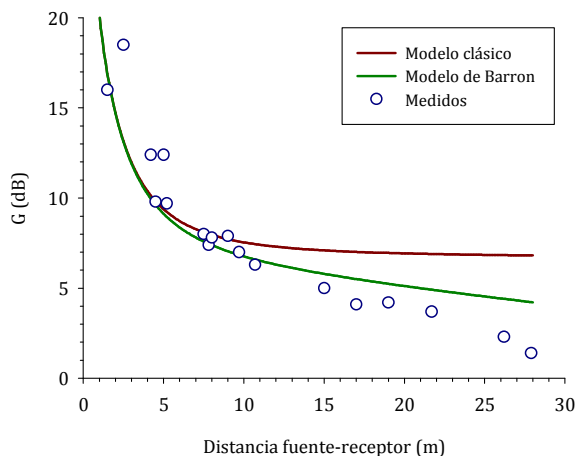


Figura 13. Variación de la fuerza sonora frente a la distancia a la fuente, comparada con las previsiones del modelo de campo difuso clásico y el de Barron, en la iglesia del H. de las Cinco Llagas tras la rehabilitación.

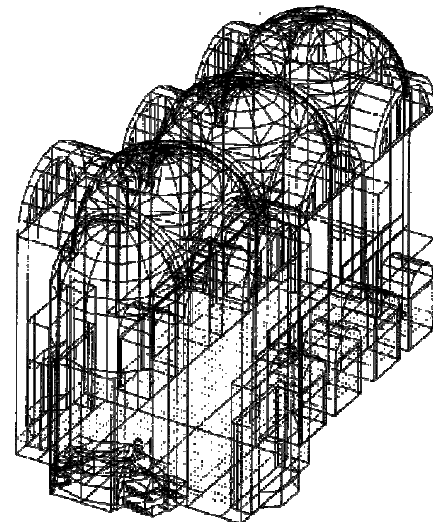


Figura 14. Modelo 3D de la iglesia del H. de las Cinco Llagas para simulación con Raynoise.

de máquinas tratada, cámara de plenum, conductos absorbente, impulsión a baja velocidad, rejillas acústicas... Así mismo, la moqueta, además de aportar absorción, tenía como misión amortiguar los ruidos de las pisadas en el interior del recinto.

Con el fin de mejorar la inteligibilidad, además de las medidas ya sugeridas para reducir la reverberación y el ruido de fondo, aprovechando que se iba a instalar el sistema de grabación de sesiones, se sugirió la instalación de un sistema de megafonía muy distribuido, orientado hacia la zona de audiencia y emitiendo a baja potencia para no excitar excesivamente todo el volumen interior.

En la Figura 7 se muestran los resultados de las previsiones teóricas y de las medidas experimentales, para el tiempo de reverberación, tras la ejecución del proyecto. Los valores

corresponden a la sala vacía, aunque dada la baja densidad de ocupación y la considerable absorción del suelo, no son de esperar variaciones significativas cuando esté ocupada. Podemos observar la importante disminución en la zona de bajas y medias frecuencias, mientras que ésta ha sido mucho menor (como se deseaba) para las frecuencias altas, situándose la curva en el entorno a la banda deseada.

La Figura 9 muestra los valores del índice RASTI tras la rehabilitación; con el sistema de apoyo electroacústico desconectado (S.E. OFF), los valores del índice permiten calificar la inteligibilidad en la zona de de audiencia como “*aceptable*” y si se conecta áquel (S.E. ON), ésta pasa a situarse en la zona alta del intervalo de calificación “*buena*”.

En cuanto a las medidas tomadas para reducir el nivel del ruido de fondo, cabe señalar que el aislamiento global medido de los cancelos fue de 42 dBA, lo que permitió, en condiciones favorables, pues las medidas se hicieron de noche, alcanzar la calificación NC-25.

En las medidas finales, se hizo una valoración de la distribución espacial del nivel sonoro en el interior de la sala determinando los valores de la fuerza sonora G (Figura 13), encontrando una atenuación con la distancia superior a la prevista por el modelo de Barron [58] para auditorios, típica de espacios eclesiales, como más adelante se verá con más detalle. A posteriori se realizó un modelo 3D para simulación (Figura 14), tanto para el estado previo como para el estado final [75]. Se utilizó el software Raynoise y los resultados se muestran en la Figura 7 para el tiempo de reverberación, con una aceptable coincidencia con los valores medidos, y en Figura 9 para el índice RASTI, con desviaciones importantes respecto de los valores experimentales. Hay que señalar que estas técnicas han mejorado notablemente y hoy es posible obtener resultados mucho más fiables, incluso en espacios complejos como son los recintos eclesiales. De hecho ésta técnica se utilizó con ventaja en la rehabilitación de la iglesia del antiguo Convento de la Compañía de Jesús de Jerez de la Frontera [76].

La Iglesia del Convento de San Francisco de Baeza

Esta excepcional iglesia Renacentista, atribuida al arquitecto Andrés de Vandelvira, quedó en ruinas después de la Guerra Civil española y permaneció así hasta la década de los 80 en que se rehabilita como centro cultural multifuncional (Figura 15). Tal rehabilitación, en gran medida, también supuso su reconstrucción, dado el estado ruinoso en el que se encontraba. El proyecto, de los arquitectos Jaime Nadal Uriguen y Sebastián Araujo Romero, se llevó a cabo sin tener en cuenta unos mínimos



Figura 15. Vista exterior e interior de la iglesia del convento de San Francisco tras la rehabilitación inicial.

criterios acústicos. Una vez terminadas las obras, y tras su puesta en servicio, se detectaron graves deficiencias funcionales relacionadas con su respuesta acústica, de modo que la “rehabilitación funcional” [77] se hace a posteriori, y se encomienda a los mismos arquitectos que habían proyectado y ejecutado la obra civil previa, una vez redactado el informe de acondicionamiento acústico por el grupo de Acústica Aplicada del IUACC, a iniciativa de la Consejería de Obras Públicas y Urbanismo de la Junta de Andalucía.

La iglesia tiene planta de cruz latina y, con la nave acortada para facilitar el acceso, ofrece tres alas para la audiencia del mismo tamaño; en el centro se encuentra una plataforma elevada que sirve de escena (Figura 16). Está cubierta con una bóveda de piedra soportada por paredes y pilastras del mismo material (Figura 15). El recinto tiene un volumen de unos 7500

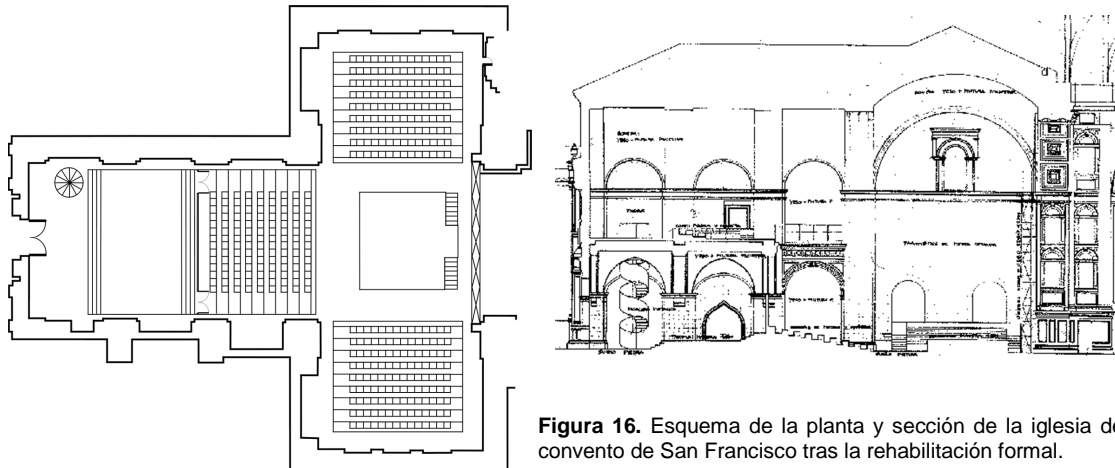


Figura 16. Esquema de la planta y sección de la iglesia del convento de San Francisco tras la rehabilitación formal.

m³, con una altura media de 15 m, una superficie interior total de, aproximadamente, 2000 m² y una superficie en planta de 286 m² para alojar 380 plazas de audiencia. Ello implica un volumen por plaza desmesurado (20 m³/persona frente a los 5-7 recomendables para el uso previsto), un volumen por área de audiencia de 25 m (aproximadamente el triple de lo deseable) y una superficie por plaza de 0.8 m²/plaza, sólo ligeramente elevada respecto a los 0.5 recomendables.

Como ya hemos señalado, tras su puesta en servicio se detectaron graves deficiencias: tiempos de reverberación absolutamente exagerados (Figura 17); niveles de ruido de fondo muy elevados (su espectro se valoró como NR-45) debido a la falta hermeticidad, intencionada en el proyecto, de los vidrios de las ventanas y del muro cortina del mismo material que cerraba la cabecera de la nave, que no se incorporó al espacio escénico, e inteligibilidad de la palabra que, incluso en la propia escena, merecía la calificación de "pobre" (Figura 18).

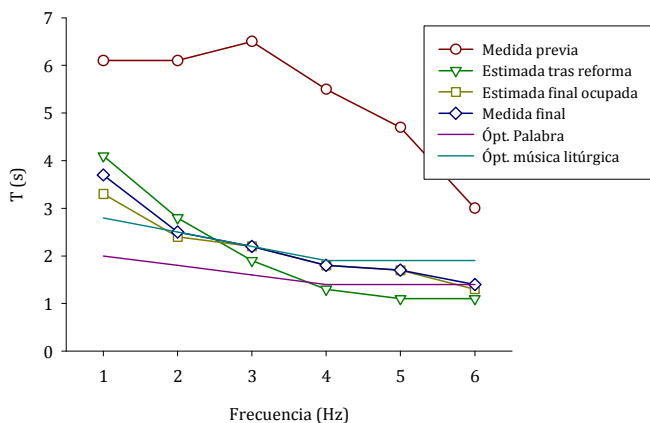


Figura 17. Tiempo de reverberación frente a la frecuencia para la iglesia del Convento de San Francisco.

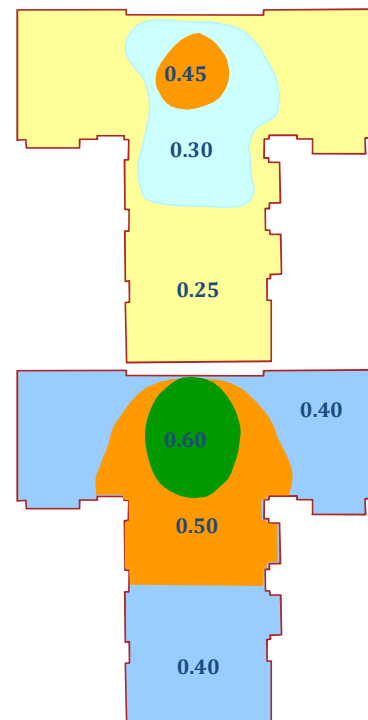


Figura 18. Esquema de la planta de San Francisco con la distribución del índice RASTI: estado previo (arriba) y tras la rehabilitación acústica (abajo).



Figura 19. Vista interior tras la rehabilitación acústica. A la izquierda, los toldos extendidos y las butacas instaladas, en el centro los toldos recogidos; y, en ambas, se aprecia el textil vertical que segrega el coro. A la derecha se puede ver el textil que cubre el muro cortina.

Ante esta situación, en el informe elaborado tras las medidas in situ, se propone una serie de medidas que los mismos arquitectos han de implementar para la corrección de las deficiencias detectadas. Para disminuir la reverberación se plantea la reducción del volumen, de forma efímera y reversible, mediante un techo textil desplegable a nivel de la cornisa, y el incremento de la absorción con la introducción de butacas acolchadas para la audiencia. Inicialmente ésta se sentaba sobre los tablonos de madera que remataban cada una de la huellas del graderío escalonado de piedra que se en la Figura 15. El techo móvil, además de reducir el volumen, tenía la función de ser absorbente, pues se configuraba como un elemento multicapa: microperforada de PVC la capa que mira a la audiencia, de material poroso la de en medio y loneta la que mira a la bóveda. Puesto que la visibilidad de la escena desde el coro era muy limitada, un elemento vertical, de la misma naturaleza y también desplegable, permitiría segregar su volumen del principal de la sala. Así mismo se propuso cubrir con un elemento textil el muro cortina de la embocadura del ábside. Todas éstas fueron asumidas por los arquitectos aunque, bien por razones presupuestarias, de diseño o dificultades mecánicas, los elementos textiles sólo se ejecutaron con la loneta (Figura 19).

Otras recomendaciones (reflectores sobre la escena, elementos absorbentes en los paños de piedra del crucero, morteros acústicos en zonas enfoscadas y reforzar la estanqueidad y aislamiento de los huecos) no se ejecutaron, ya sea por razones económicas, formales o de diseño.

Como podemos observar en la Figura 17, los valores finales del tiempo de reverberación se sitúan en la zona alta de la banda recomendada, por lo que aún resultan algo elevados, dado el pretendido carácter multifuncional del recinto, sobre todo en la zona de bajas frecuencias. La presencia de la capa microperforada de PVC, más impermeable al aire que la loneta, con seguridad habría mejorado este comportamiento. No obstante los valores del índice RASTI aumentan sensiblemente y se sitúan en el rango de calificación de “acceptable” (Figura 18).

Para terminar, cabe citar que en la representación de la ópera *Ifigenia in Áulide*, del compositor Martín y Soler, en el VII festival de Música Antigua de Úbeda y Baeza, un crítico escribía: “*la orquesta sonó estupendamente...*” y más adelante, parece integrar los elementos de acondicionamiento acústico en la escenografía, al escribir: “*las telas desplegadas en forma de velas, ..., ayudaban al desarrollo narrativo sin necesidad de recurrir a la originalidad por la originalidad*” (Figura 20).

ÓPERA

Maravilla en Baeza

Ifigenia en Áulide

De Vicente Martín y Soler. Real Compañía Opera de Cámara. Director musical y escénico: Juan Bautista Perea. Con Olga Pitarich, Lola Casariego, Luigi Petrosi, Betabée Haas y Patricia Llorens. VII Festival de Música Antigua de Úbeda y Baeza. Auditorio Reinau de San Francisco. Baeza, 6 de diciembre.

Partitura bellísima

Lo visto y escuchado en Baeza ha sido un acontecimiento: una partitura bellísima, con momentos espléndidos en el cuarteto del final del primer acto, el dúo de Ifigenia y Achille después, o los momentos individuales de Olga Pitarich (qué estampa de gran trágica como Ifigenia) o de una insipridísima, vocal y dramáticamente, Lola Casariego en el papel de Achille. La orquesta sonó estupendamente y aun se habría superado reforzando los sonidos graves —contrabajo, fagot, violoncellos— para imprimir un sello más acentuado de expresividad. En cuanto a la puesta en escena, fue elemental pero efectiva, con una baza de oro en la utilización de los marcos naturales del viejo monasterio franciscano y también en la simbología de un vestuario más intenso conforme la obra avanzaba. Las telas desplegadas en forma de velas, o los recursos físicos y corpóreos en primer plano, ayudaban al desarrollo narrativo sin necesidad de recurrir a la originalidad por la originalidad.

El festival de Úbeda y Baeza ha dado una vuelta de tuerca a su modesta trayectoria con su primera producción operística. La gente de Baeza lo recibió con entusiasmo. No debería apartarse en exceso, pienso, de su especialización valencianista, pues en ese terreno, y con la solvencia y rigor de sus organizadores, puede convertirse en un referente mundial. Para este comentarista ha sido una de las sorpresas del año (se adelantó, en cualquier caso, el divo alemán *Frankfurter Allgemeine Zeitung: (chappau)*). Y es que a veces surge la gran música en los sitios más inesperados. En Baeza, por ejemplo: maravilloso.

Figura 20. Crítica en prensa de *Ifigenia in Áulide*, reestrenada en S. Francisco.

INVESTIGACIÓN EN ACÚSTICA DE SALAS Y PATRIMONIO EN EL IUACC

Los trabajos técnicos seleccionados para su presentación en la sección anterior, entre otros muchos, constituyen las bases de una trayectoria investigadora sobre acústica de salas, orientada hacia los espacios eclesiales, en el grupo interdisciplinar de Acústica Aplicada del IUACC.

Los primeros frutos de esta investigación fueron dos tesis doctorales. La primera [74], elaborada por un arquitecto, analiza diferentes espacios eclesiales de la provincia de Córdoba (incluida la Mezquita Catedral) para hacer propuestas proyectuales de adecuación acústica de los diferentes espacios, con la necesaria perspectiva del carácter patrimonial de los mismos. En particular, en el caso de la Mezquita Catedral, se estudian las conductas acústicas singulares que se producen en el espacio vertical de la catedral, insertado en el espacio horizontal de la mezquita musulmana, dos modelos tipológicos bien definidos y conocidos acústicamente de forma independiente, que se complementan mutuamente, generándose una nueva unidad arquitectónica dotada de una acústica propia y diferenciada [53,54,55,56] (Figura 21). A partir de este conocimiento, se formulan en este caso las propuestas arquitectónicas de intervención acústica, para su adaptación a las necesidades tanto litúrgicas como culturales [54]. La segunda [60], elaborada por un físico, analiza el comportamiento acústico de un conjunto de iglesias gótico-mudéjares sevillanas y, partiendo de la base de la tipología común, se busca e implementa un modelo analítico sencillo capaz de describir con suficiente aproximación el campo acústico generado en su interior [66]. A continuación nos detenemos con más detalle en esta última.

Las Iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla

Las iglesias gótico-mudéjares sevillanas se identifican como “*el tipo parroquial sevillano*” por los historiadores del arte (Figura 22). Tienen un fuerte carácter simbólico multicultural; hemos de tener en cuenta que el mudéjar no puede entenderse como una parte del arte islámico o del arte occidental cristiano, propiamente dichos; es más bien un eslabón de enlace entre ambos; un fenómeno singular del arte español. Su importancia patrimonial y cultural en la ciudad es muy significativa; como muestra de ello, cabe comentar que, con motivo de la celebración de la Exposición Universal de Sevilla de 1992, la comisararía de la ciudad, con el patrocinio de diversas entidades,

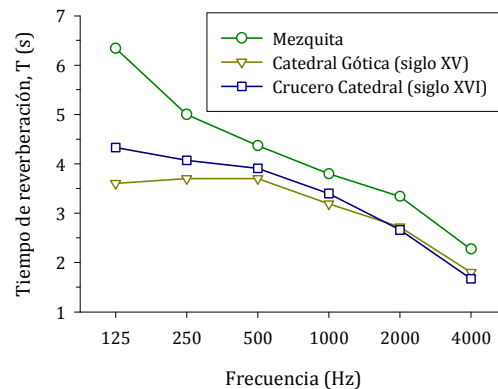


Figura 21. Tiempos de reverberación en la Mezquita Catedral de Córdoba.

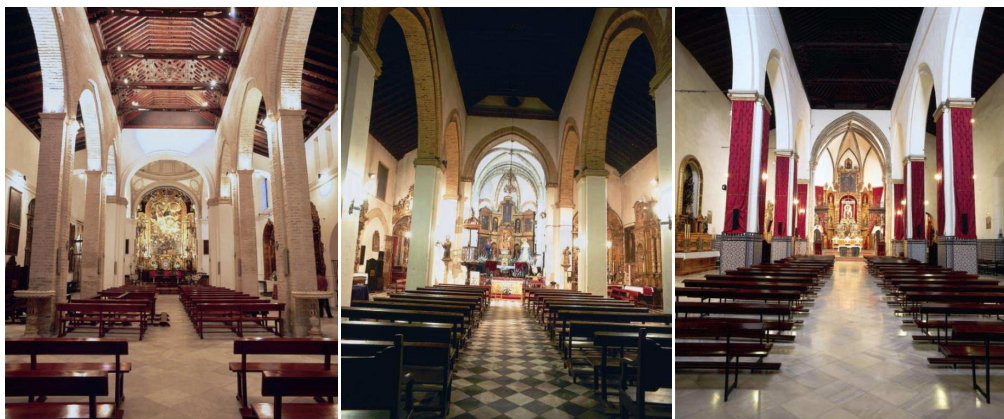


Figura 22. Interior de las iglesias de San Isidoro, Santa Catalina y San Julián (de izquierda a derecha).

elaboró unas fichas de rutas de paseo por la ciudad en las que destacaban explícitamente las iglesias gótico-mudéjares como monumentos muy significativos de la misma.

Como ya hemos comentado, el concepto de patrimonio arquitectónico ha sido actualizado para incorporar a los tradicionales aspectos visuales y formales, los aspectos acústicos. En este contexto, asumiendo la importancia de las citadas iglesias como un vínculo entre las culturas cristiana y musulmana en el sur de España, se ha caracterizado su comportamiento acústico midiendo los parámetros monoaurales más ampliamente aceptados para describir la acústica de espacios significativos, analizando tanto su comportamiento espectral como su distribución espacial. Este conocimiento facilitará futuros proyectos de rehabilitación, tomando en consideración en los mismos las condiciones acústicas. Además, puesto que es frecuente la programación de eventos musicales en estos templos, conocer su comportamiento acústico puede facilitar las decisiones a tomar, efímeras o permanentes, para mitigar sus deficiencias.

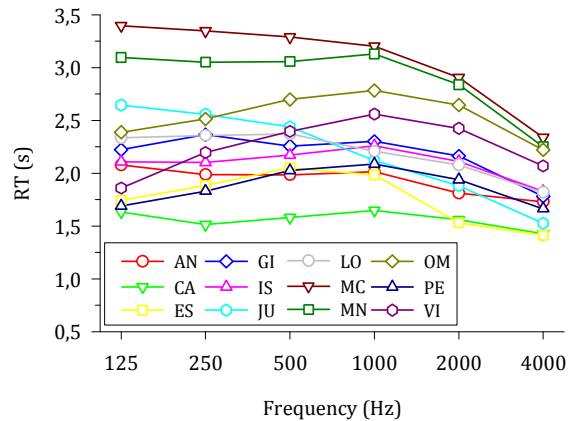


Figura 23. Tiempos de reverberación de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla.

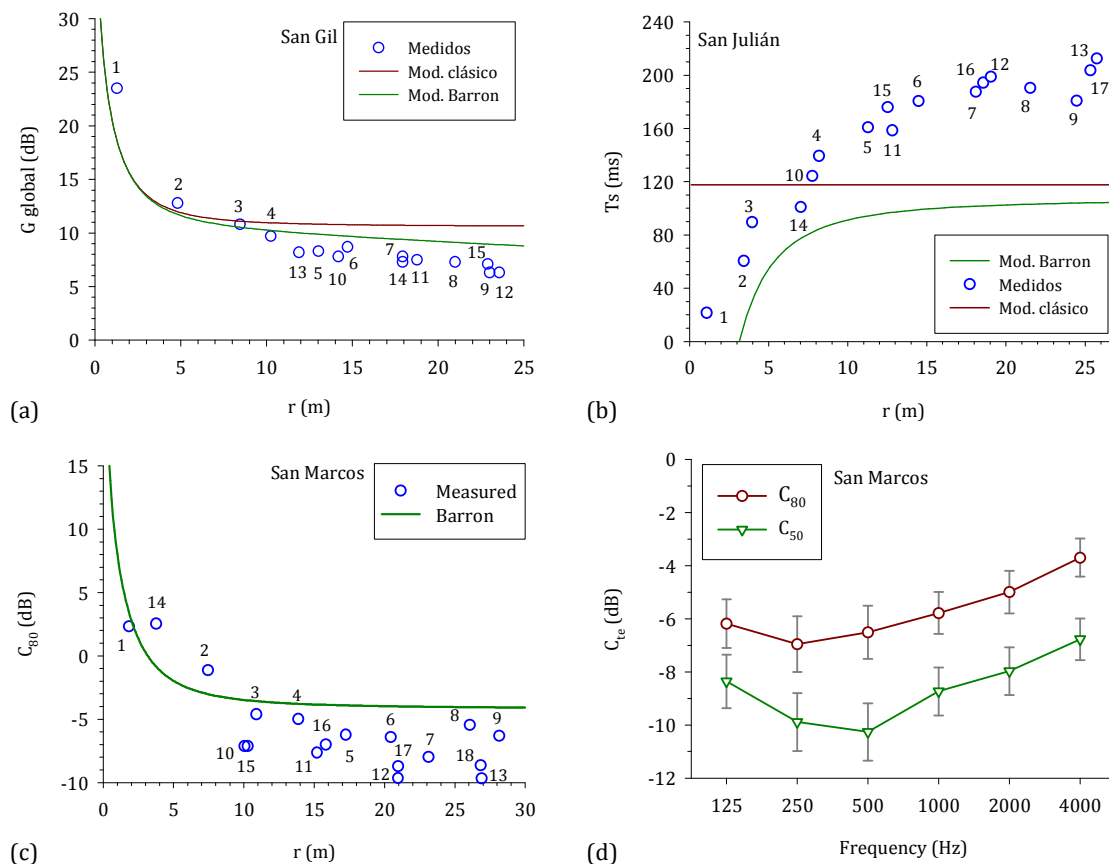


Figura 24. Valores medidos frente a la distancia: (a) de G (global) en San Gil, (b) de T_s en San Julián y (c) de C_{80} en San Marcos; los números identifican los receptores. En (d) se muestra el comportamiento espectral promedio para C_{80} y C_{50} en San Marcos, con indicación de la dispersión espacial mediante el error estándar.

Los tiempos de reverberación (Figura 23) tienden a disminuir a bajas frecuencias debido a la presencia de absorbentes tipo membrana; siendo los más importantes los bancos de las zonas de audiencia y, sobre todo, las cubiertas de madera, que constituye una de las características formales más importantes de estos recintos. Los resultados experimentales, no obstante, se desvían notablemente de los tiempos de reverberación óptimos sugeridos en la bibliografía para las actividades que se desarrollan en estos espacios (ver Figura 33).

El campo acústico interior muestra un comportamiento no difuso debido a la concentración de la absorción en la zona de la audiencia, del techo de madera y de las naves laterales (retablos, altares,...). La distribución de los niveles sonoros, tiempo central, claridad y definición para distancias superiores al radio acústico revela desviaciones notables respecto del comportamiento previsto por el modelo de campo difuso o del derivado de la teoría revisada de Barron [58] para auditorios (Figura 24). Por tanto se requiere un mejor conocimiento del mecanismo de extinción de la densidad de energía sonora y ello puede conducir a un modelo semiempírico para las iglesias gótico-mudéjares, siguiendo el modelo de Cirillo et al. [38]. El comportamiento espectral típico promedio de los parámetros de claridad, junto con la dispersión espacial asociada, se muestra en la Figura 24(d).

Se cuantificó la inteligibilidad de la palabra, con y sin apoyo electroacústico, mediante el índice RASTI (Figura 25). Los bajos valores de C_{50} y D_{50} obtenidos, para todas las bandas de octava, refuerzan la calificación de "pobre" para la inteligibilidad. La efectividad de los sistemas de apoyo electroacústico, en muchos casos, se reduce a conseguir una distribución espacial más uniforme de los valores, más que a un aumento de la calificación de las diferentes zonas.

Las iglesias presentan un comportamiento acústico simétrico respecto del eje longitudinal y la presencia de la cubierta de madera es un factor determinante para la mejora de las condiciones acústicas puesto que en San Marcos, cuyo techo de madera ha sido sustituido por otro cerámico, todos los parámetros presentan los valores más adversos.

Con el fin de calificar globalmente y resumir el comportamiento acústico de cada templo, en la

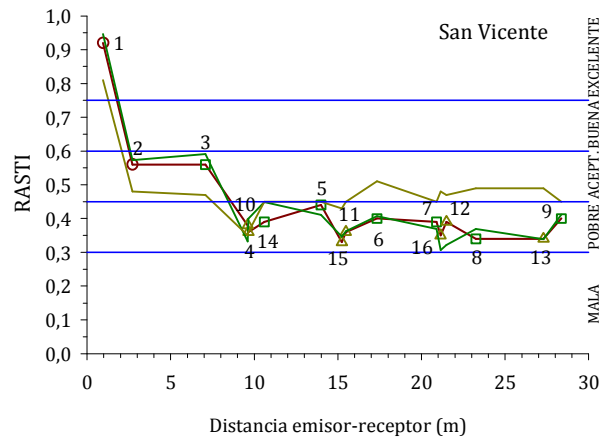


Figura 25. RASTI en función de la distancia al emisor para tres experimentos: equipo B&K ref+10 dB (en rojo), ídem con apoyo electroacústico (dorado), y señales MLS (verde). Los símbolos indican la ubicación de los receptores (numerados): (○) presbiterio, (□) nave central y (△) naves laterales.

Tabla 1. Calificación acústica de las iglesias gótico-mudéjares. Los superíndices en el nombre designan el acrónimo de cada iglesia.

Iglesia	T_S (ms)	C_{80av} (dB)	LF (%)	Música ^a	D_{50} (%)	C_{50av} (dB)	RASTI ^b	Palabra	T (s)	G (dB)	NR
S. Andrés ^{AN}	151	-2.32	23	Poor	29.7	-5.48	0.45	Poor-Fair	2.00	9.22	35
Sta. Catalina ^{CA}	104	1.10	20	Fair	42.7	-1.76	0.60	Fair	1.61	9.15	35
S. Esteban ^{ES}	136	-0.83	17	Poor	34.0	-3.18	0.43	Poor	2.02	8.50	40
S. Gil ^{GI}	167	-2.14	18	Poor	31.3	-3.70	0.45	Poor-Fair	2.28	7.48	35
S. Isidoro ^{IS}	189	-4.05	20	Poor	20.0	-6.54	0.42	Poor	2.22	9.33	35
S. Julián ^{JU}	152	-1.29	17	Poor	35.2	-2.56	0.49	Fair	2.28	8.37	30
S. Lorenzo ^{LO}	172	-2.42	21	Poor	29.2	-4.17	0.47	Fair	2.29	7.04	30
S. Marcos ^{MC}	269	-5.77	16	Poor	16.3	-8.21	0.35	Poor	3.25	11.50	40
Sta. Marina ^{MN}	213	-3.03	17	Poor	30.0	-4.48	0.38	Poor	3.09	7.88	40
Omnium Sanct. ^{OM}	208	-3.36	17	Poor	25.3	-5.51	0.40	Poor	2.74	7.89	35
S. Pedro ^{PE}	148	-1.74	18	Poor	32.9	-3.79	0.47	Fair	2.06	9.47	40
S. Vicente ^{VI}	190	-2.87	14	Poor	26.2	-5.14	0.42	Poor	2.48	8.30	40

^aValores recomendados para auditorios: $T_S < 140$ ms; $-4\text{dB} \leq C_{80} \leq 4$ dB; LF > 20%.

^bValores RASTI correspondientes a las naves centrales sin apoyo electroacústico

Tabla 1 se muestran los valores promediados (ver [63]) de todos los parámetros. Estos parámetros se correlacionan con la percepción de la música, por un lado, y de la palabra, por otro, y, por tanto, tiempo de reverberación, fuerza sonora y el índice de ruido de fondo se facilitan para ambas percepciones y la consecuente calificación de la iglesia. Con respecto al comportamiento musical, cabe mencionar que San Marcos y las iglesias con mayor volumen presentan valores razonables de los parámetros acústicos para música de órgano, mientras que presentan deficiencias para otro tipo de actuaciones musicales.

Este primer análisis sugiere un comportamiento tipológico que fue posteriormente investigado. Con esta perspectiva se calcularon los valores promediados espacialmente y su dispersión asociada para cada una de las bandas de octava y se utilizaron en posteriores estudios.

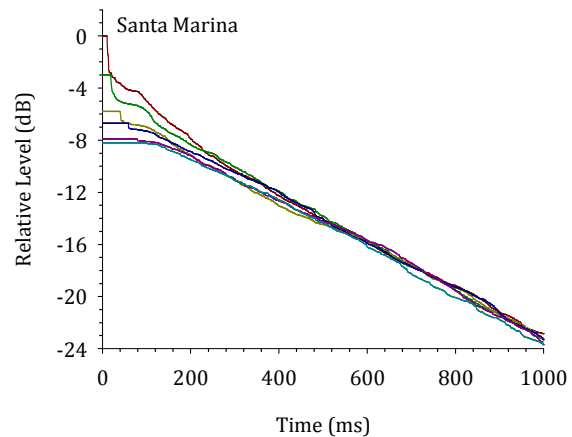


Figura 26. Curvas de extinción en distintas posiciones, a 1000 Hz, en la nave central de Santa Marina. El instante $t=0$ coincide con el de emisión de la fuente y la escala del eje vertical es relativa: 0 dB corresponden al nivel acústico estacionario del punto más cercano.

Un Modelo Analítico para Describir la Energía Acústica en Espacios Eclesiales

Gade [78] sugiere que, volumen y tiempo de reverberación, son los factores determinantes que controlan los valores de los parámetros acústicos de los auditorios que analiza, y propone la posibilidad de obtener, mediante regresión, fórmulas empíricas capaces de predecir estos parámetros. En este contexto, y tomando ventaja del modelo de Barron [58] para auditorios, parecía interesante modelar la atenuación adicional medida de los parámetros energéticos con la distancia al emisor (Figura 24). El modelo propuesto pretende mantener la simplicidad del de Barron pero ha de ser capaz de describir los datos experimentales. De esta forma sería posible implementar modelos tipológicos, en términos de características arquitectónicas, que pudieran aplicarse de forma inmediata y sencilla para tomar decisiones de intervención.

El modelo previo de Sendra et al. [57] para este tipo de espacios de culto, sólo describía de forma adecuada la variación con la distancia de los niveles de presión. Para soslayar esta limitación se realiza un análisis de las diferencias relativas en las curvas de extinción en función de la distancia (Figura 26); de este análisis se deduce que estas diferencias se incrementan conforme crece la distancia y afectan fundamentalmente a la energía inicial de las caídas.

Con el fin de mantener la simplicidad del modelo, este comportamiento puede describirse mediante un proceso de extinción lineal, con la misma pendiente que la de la teoría clásica, para la energía inicial, pero añadiéndole una atenuación adicional. Esto supone admitir una discontinuidad en $t=80$ ms, instante elegido para separar energía inicial y tardía, tal como se muestra en la Figura 27 para un punto de la iglesia de San Pedro de Sevilla.

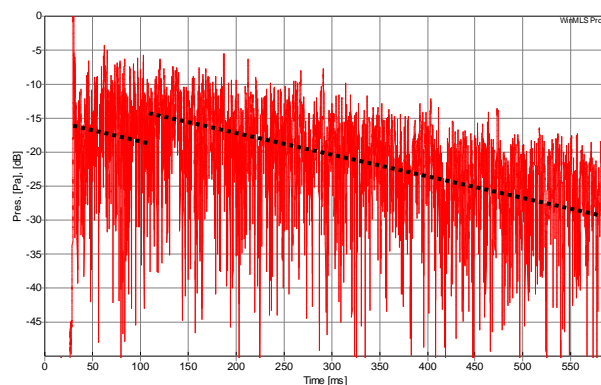


Figura 27. Curva energía-tiempo en un receptor de la iglesia gótico-mudéjar de S. Pedro (Sevilla) y comportamiento teórico del modelo μ (línea de puntos).

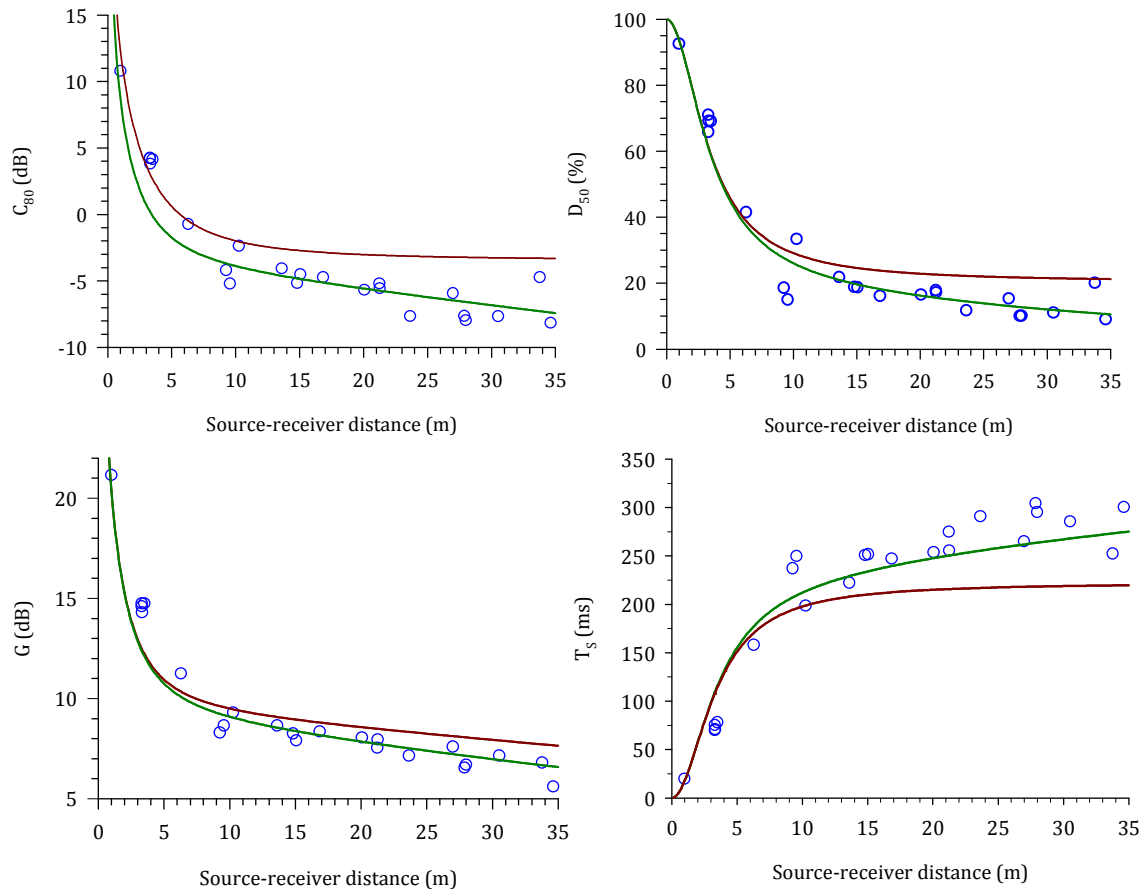


Figura 28. Valores de los parámetros acústicos de la iglesia de Santa Marina, medidos (O), y calculados, a partir del modelo de Barron (línea roja) y del modelo propuesto μ (línea verde), frente a la distancia al emisor.

Ambos patrones están basados en el modelado de las primeras reflexiones que alcanzan al receptor. En este sentido, la secuencia y magnitud de las reflexiones iniciales están fuertemente influenciadas por las características geométricas y acústicas en las proximidades de la fuente y de cada uno de los receptores, especialmente por las propiedades difusoras de estas superficies como sugiere Cirillo [39]. En este caso, la posición de la fuente en el presbiterio, donde es usual la presencia de retablos muy decorados y mobiliario, producen dispersión de la energía en las proximidades del emisor, lo que es más raro que ocurra en los auditorios. De modo análogo, cerca de cada receptor se encuentran pilastras, altares laterales y capillas, bancos de madera, techo difusor (característica esencial de esta tipología) que producen también un efecto dispersor en la energía reflejada. Por ello, el patrón de las reflexiones iniciales es diferente en las iglesias respecto del de otros recintos. Con el fin de mantener la simplicidad del modelo de Barron, se considera una atenuación adicional para la energía inicial, que se puede describir mediante la ecuación:

$$e_{\mu} = \frac{31200T}{V} e^{-\frac{\mu r}{T}} \left(1 - e^{-\frac{13.82\tau}{T}} \right), \quad (1)$$

con $\tau = 80$ ms, y se asume el modelo de Barron para la energía tardía [66].

La mejor opción para la evaluación de esta atenuación adicional resultó al ajustar la energía inicial descrita por (1) a los valores experimentales de C_{80} . Para cada iglesia se obtuvo, por regresión no lineal, el valor del parámetro μ que describe esta atenuación. El modelo tipológico se elabora utilizando el valor medio de todos ellos ($\bar{\mu}$), ya que los valores del parámetro ajustado μ , para todas las iglesias, se encuentran en el intervalo $\bar{\mu} \pm 1.5\sigma_{\mu}$. Determinado el

valor del parámetro del modelo, a partir de las expresiones que describen la densidad de energía inicial y final, es posible determinar analíticamente el resto de los parámetros para cada punto en función de su distancia al emisor. En la Figura 28 se comparan los valores medidos experimentalmente con los previstos, tanto por el modelo de Barron como por el modelo μ propuesto.

El modelo propuesto se utiliza en la discusión de los parámetros que describen la sensación de espacialidad (ASW y LEV) en [65] y para describir la inteligibilidad en [79]. Para no extendernos más, se remite al lector para más detalles a las referencias citadas.

Finalmente es necesario mencionar que la metodología implementada se ha ampliado y aplicado a otras tipologías poniendo de manifiesto su potencial de predicción [67,68]. De todos modos es necesario una investigación más extensa y disponer de más medidas in situ; por ello, en el grupo de Acústica Aplicada del IUACC, se están desarrollando dos tesis doctorales, una relacionada con las iglesias barrocas y otra con las diseñadas por Miguel Fisac, que sin duda aportarán nuevas perspectivas sobre el modelo propuesto.

El Uso de las Técnicas de Simulación Acústica en Espacios Eclesiales

Las técnicas de simulación, basadas fundamentalmente en los métodos de la acústica geométrica, han adquirido tal grado de madurez que hoy se utilizan con profusión para evaluar el campo acústico interior de recintos, incluso en las fases de diseño, permitiendo simular con precisión razonable, tanto el comportamiento espectral de los parámetros acústicos como su distribución espacial. Para edificios existentes, sobre todo para los que tienen un carácter patrimonial, este procedimiento permite una evaluación fiable de las repercusiones de las actuaciones de mantenimiento, restauración y acondicionamiento para nuevos usos; así como la recreación del ambiente acústico en épocas pretéritas. Incluso permiten la posibilidad de realizar auralizaciones en todas estas situaciones. En la Figura 29 se presenta el modelo 3D elaborado para la simulación del campo sonoro de la iglesia de Santa Marina.

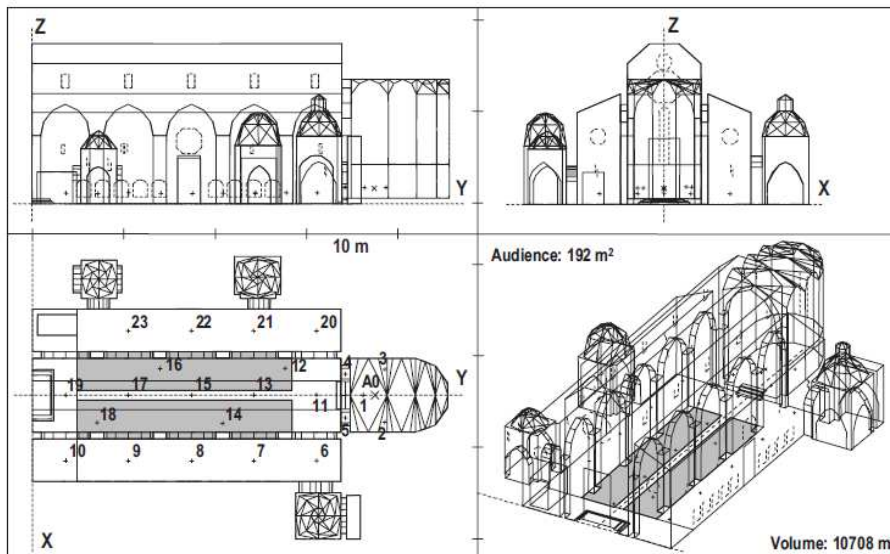


Figura 29. Secciones longitudinal y transversal (arriba) y planta y modelo 3D (abajo) creado para la simulación de la Iglesia de Santa Marina.

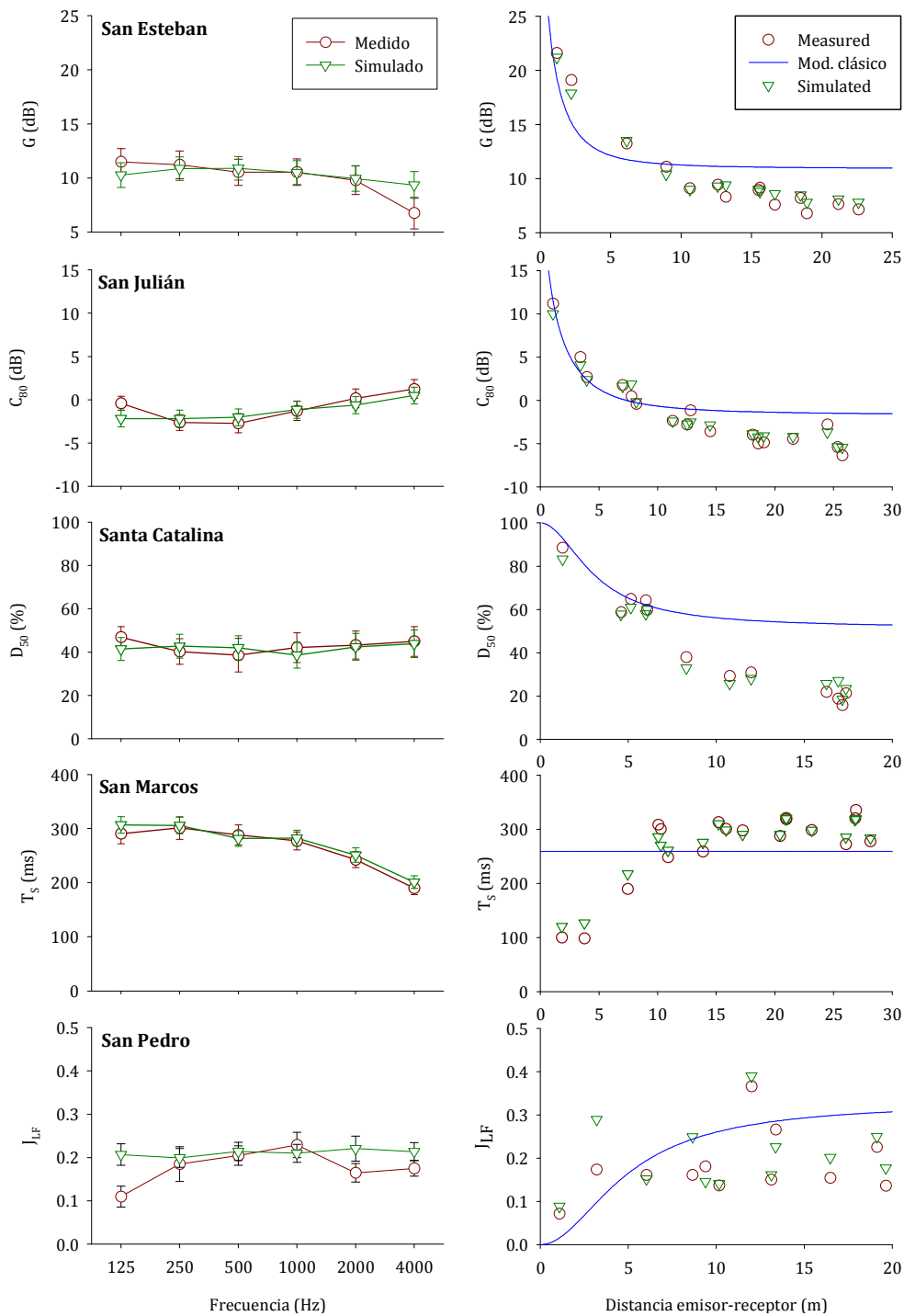


Figura 30. Comportamiento espectral (izquierda) y con la distancia al emisor (valores promedio en frecuencia) (derecha) para los parámetros indicados en las iglesias señaladas. Se comparan los valores medidos y simulados. A modo de referencia, a la derecha, se muestra la curva correspondiente al modelo de campo difuso (clásico).

Uno de los problemas más graves a resolver es el de disponer de datos de entrada fiables, sobre todo para los coeficientes acústicos de los materiales. El conocimiento de los datos experimentales de los tiempos de reverberación permite el ajuste, mediante un proceso iterativo, de los valores de los coeficientes de absorción y dispersión, que caracterizan su comportamiento acústico, de aquellas superficies interiores que presentan una mayor incertidumbre, o bien adaptarlos para aquellas que presentan una configuración compleja (paredes con cuadros,

imágenes, molduras,...), muy comunes en las iglesias. Para otras superficies el coeficiente de scattering (del que hay pocos datos experimentales aún) se estima a partir de las dimensiones relativas de sus irregularidades geométricas.

De esta forma, esta metodología, que puede suponer una limitación, es al mismo tiempo una ventaja pues, como hemos señalado, facilita la toma de decisiones en el uso, mantenimiento y adecuación del espacio. En efecto, este punto de partida (que se puede realizar de forma iterativa abreviada) asegura una simulación adecuada de las respuestas al impulso (RI) y, en consecuencia, gran precisión en los valores de los parámetros acústicos más significativos deducidos a partir de estas RI, e incluso su uso para auralizar, a partir de material sonoro anecoico, permitiendo recreaciones acústicas relacionadas con los aspectos patrimoniales del espacio. Esta fiabilidad aparece tanto en el comportamiento espectral como en la dispersión espacial, así como en la distribución espacial de los valores espectralmente promediados, comunmente utilizados para calificar la acústica

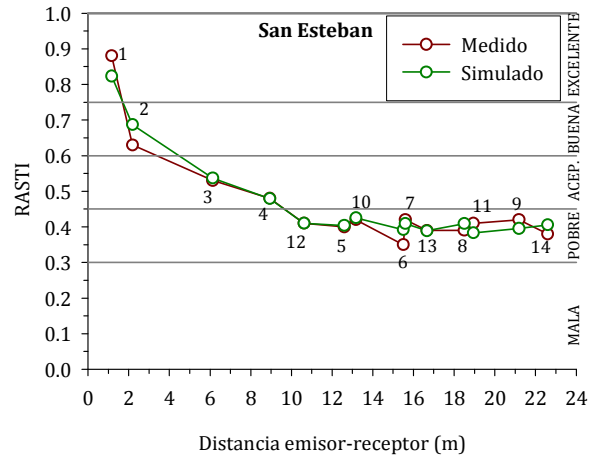


Figura 31. Comparación de los valores RASTI medidos y simulados para la iglesia de San Esteban. Los receptores 1 y 2 están en el presbiterio, del 3 al 9 en la nave central y del 10 al 14 en las naves laterales.

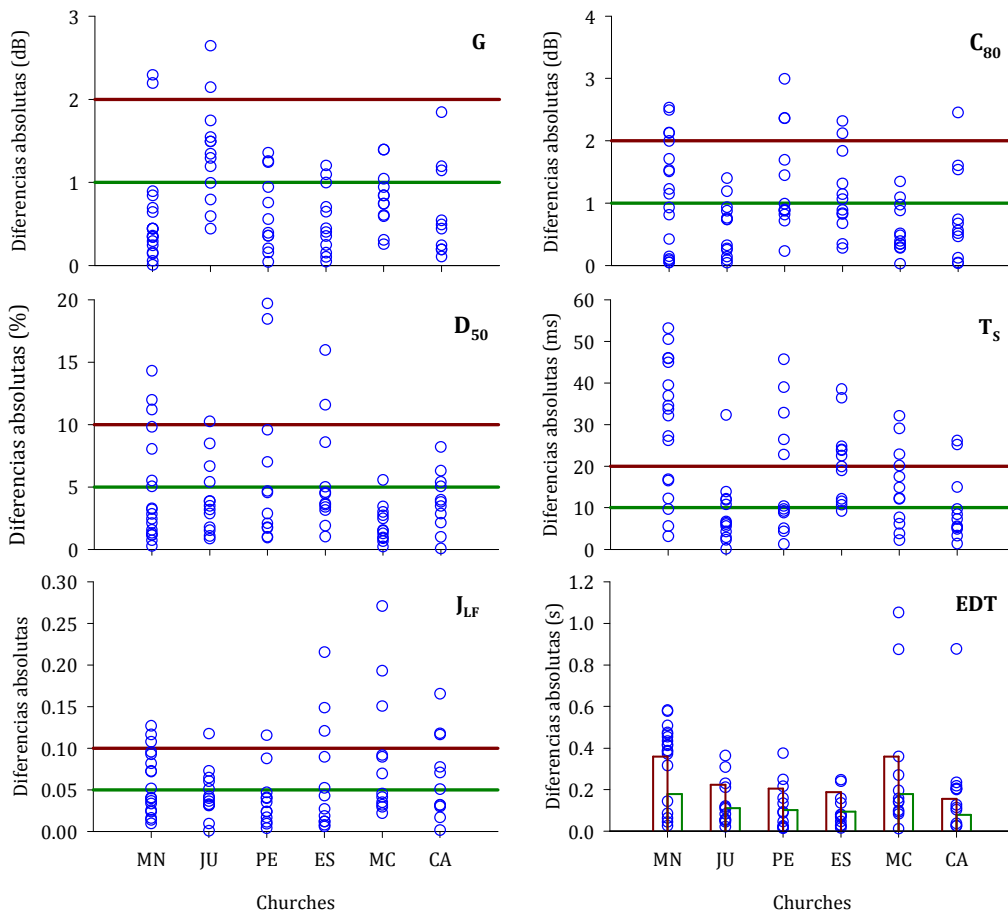


Figura 32. Diferencias absolutas entre valores medidos y simulados, espectralmente promediados, para cada uno de los receptores en cada iglesia y para cada parámetro (círculos). Se han indicado dos límites en función del respectivo JND: línea verde para un JND y roja para dos JNDs.

del recinto, sobre todo en lo que se refiere a su dependencia de la distancia fuente-receptor. Efectivamente, como se muestra en la Figura 30 y en la Figura 31, tras la calibración del modelo, los valores simulados y medidos experimentalmente muestran un alto grado de coincidencia, que ha de valorarse, más que en términos numéricos absolutos, en función de los respectivos JND (just noticeable difference) o valores umbrales de discriminación perceptiva tal y como se ve en la Figura 32.

De esta forma, mediante las simulaciones, es posible recrear el comportamiento acústico de los recintos de culto, para la configuración y funciones litúrgicas diversas, tanto actuales como del pasado. Estas recreaciones se han implementado con éxito en el caso de las iglesias Gótico-Mudéjares. En concreto se utilizó esta técnica en el caso de la iglesia de San Marcos, cuya cubierta de madera mudéjar de la nave central, tras ser destruida en un incendio, se ha sustituido por rasillones cerámicos apoyados sobre correas metálicas. Se modificó el modelo original para incluir la primitiva cubierta de madera y observar el efecto de la audiencia ocupando los bancos de madera. En la Figura 33 se muestra la variación en el tiempo de reverberación en cada una de las situaciones y, en la Figura 34, este efecto sobre la claridad musical, C_{80} , tanto es su comportamiento espectral y dispersión espacial, como la dependencia de los valores promediados espectralmente respecto de la distancia emisor-receptor.

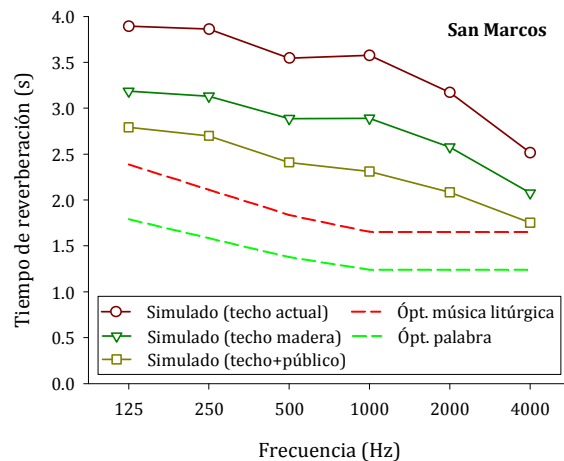


Figura 33. Tiempo de reverberación simulado en bandas de octava para la iglesia de San Marcos y valores recomendables para música litúrgica y palabra.

TRABAJO FUTURO EN ACÚSTICA Y PATRIMONIO DESDE EL IUACC

En este contexto y con estos antecedentes, en la convocatoria de 2010 del Plan Nacional de I+D+i, el Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla presentó un proyecto interdisciplinar titulado: “La **acústica** de las **catedrales**: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural” (ACUSCATEMONIO). Este proyecto ha sido concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523) y resuelto su financiación para ser ejecutado en los tres próximos años (2011-2013). En él figuran como Entes Promotores y/o Observadores (EPOs) el Ministerio de Cultura, la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y la Orquesta Barroca de Sevilla, además de cinco de los cabildos de las catedrales que constituyen la muestra objeto de estudio. Su presencia resultó de suma importancia en el proceso de evaluación, así como el

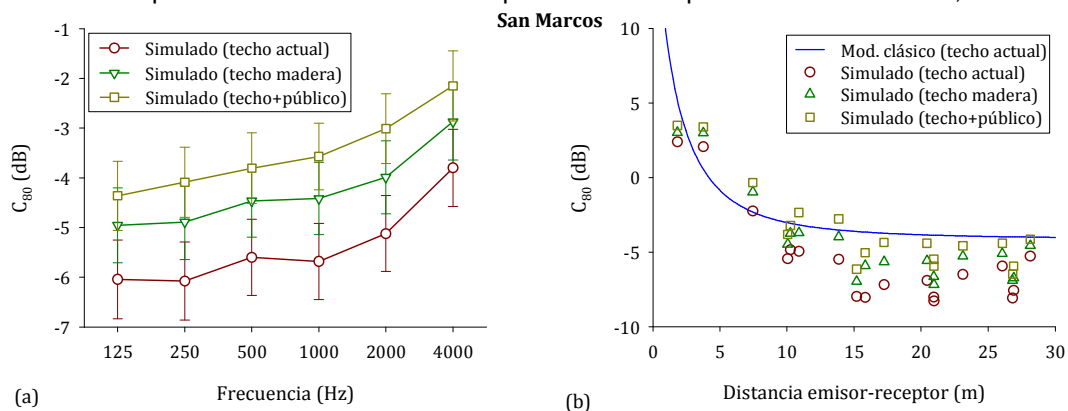


Figura 34. Comparación de tres simulaciones realizadas para la iglesia de San Marcos para la claridad musical (a) frente a la frecuencia y (b) frente a la distancia emisor-receptor.

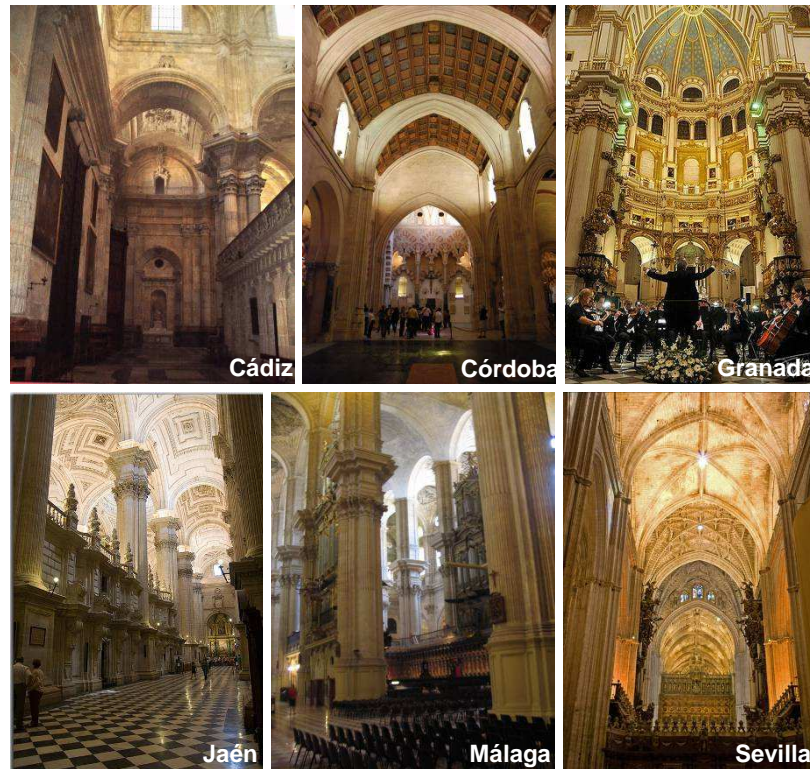


Figura 35. Vista interior de las 6 catedrales objeto del proyecto ACUSCATEMONIO.

carácter *interdisciplinar* del equipo formado para llevarlo a cabo y en el que participan físicos, ingenieros, arquitectos e historiadores del arte pertenecientes, tanto al citado instituto, como al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) dependiente del Ministerio de Cultura.

Este proyecto pretende caracterizar el comportamiento acústico de las principales catedrales andaluzas: Cádiz, Córdoba, Granada, Jaén, Málaga y Sevilla (Figura 35), con el objetivo de adecuar el modelo analítico μ , capaz de describir el campo acústico en el interior, y elaborar los modelos 3D para simular y auralizar, con perspectiva histórica, dichos campos sonoros. Además, desde la visión global que permite el acercamiento interdisciplinar, será posible sugerir instrumentos de intervención acústica, permanentes o efímeras, en estos espacios, no consideradas como estrategias, sino como pautas, relaciones y formas de intervención

Para entender este comportamiento resulta del máximo interés llevar a cabo una investigación, de carácter histórico, sobre la aparición y evolución de los elementos arquitectónicos que han ido condicionando la acústica de esas catedrales (coros, púlpitos, órganos, etc.) (Figura 36) y



Figura 36. Órgano de la catedral de Sevilla, púlpito de la de Málaga y coro de la de Córdoba.



Figura 37. Montaje efímero para el día del Corpus en la catedral de Sevilla.

de los eventos que se han venido desarrollando en su interior, con diferentes exigencias acústicas (palabra y música coral e instrumental), a lo largo de su historia: coronaciones, bodas, defunciones, sínodos, magnos conciertos, etc. y los montajes efímeros a los que dieron lugar (Figura 37).

Este conocimiento científico supondrá una



Figura 39. Vista interior hacia el ábside de la catedral de Málaga.

importante aportación al carácter patrimonial de estos edificios, al incorporar una novedosa y original forma de identificación de los mismos a partir de la visión espacio-funcional, introduciendo la valoración acústica, frente a la óptica tradicional estilístico-formal, a la que se suele conocer como *patrimonio inmaterial*. No se ha producido un estudio similar hasta la fecha en España y el antecedente europeo más cercano puede estar en el estudio de las mezquitas de Sinan, llevado a cabo en el proyecto CAHRISMA [6,7,8], que ya hemos citado. Así mismo el proyecto permitirá incorporar pautas de intervención, tanto para la recuperación funcional de estos espacios

catedralicios, como para actuaciones efímeras de carácter religioso o cultural, o tomar decisiones de intervención con un conocimiento más amplio de las características de los templos, abriendo el camino a nuevas interpretaciones y actuaciones.

El objetivo general de este proyecto de estudiar la acústica de las catedrales desde este enfoque, no sólo es compartido por el Ministerio de Cultura, sino que complementa muy bien su programación sobre el patrimonio cultural español en los próximos años: el Plan Nacional de Catedrales y el Plan Nacional del Patrimonio Inmaterial están pendientes de cumplimentar sus objetivos con estudios adicionales como el que aquí se plantea.

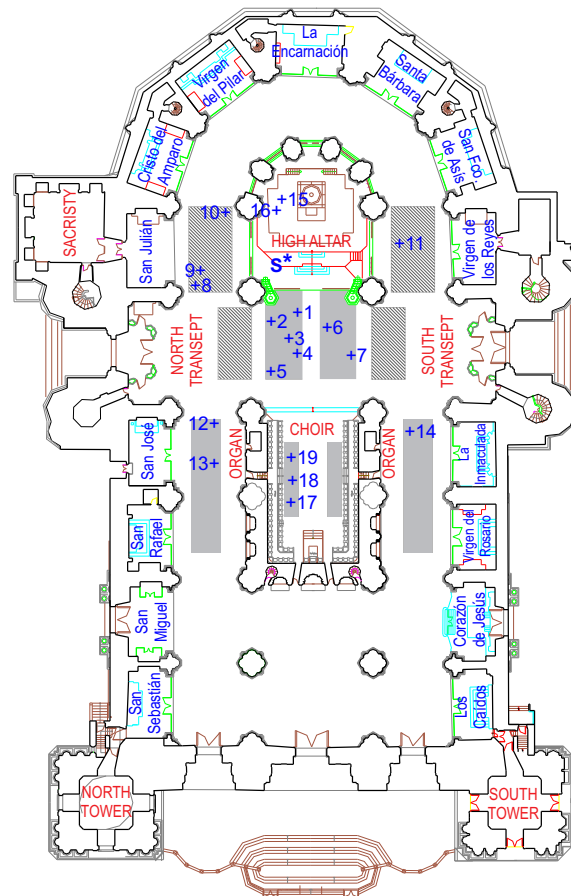


Figura 38. Planta de la catedral de Málaga. En gris, la zona de bancos y, rayada, la de sillas para la audiencia; (S), posición de la fuente y (+) de los receptores.

importante aportación al carácter patrimonial de estos edificios, al incorporar una novedosa y original forma de identificación de los mismos a partir de la visión espacio-funcional, introduciendo la valoración acústica, frente a la óptica tradicional estilístico-formal, a la que se suele conocer como *patrimonio inmaterial*. No se ha producido un estudio similar hasta la fecha en España y el antecedente europeo más cercano puede estar en el estudio de las mezquitas de Sinan, llevado a cabo en el proyecto CAHRISMA [6,7,8], que ya hemos citado. Así mismo el proyecto permitirá incorporar pautas de intervención, tanto para la recuperación funcional de estos espacios

Aunque el proyecto está en su fase inicial, ya se han abordado algunas de las tareas programadas, tanto de carácter histórico-arquitectónico y documental, como de carácter acústico. En este sentido, se han realizado medidas experimentales en las catedrales de Málaga y en la de Sevilla, y se han completado los primeros modelos 3D de ambas para la simulación en el estado actual.

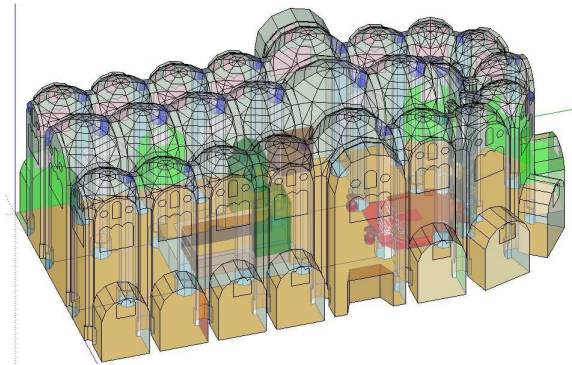


Figura 40. Modelo 3D del estado actual de la catedral de Málaga elaborado para la simulación.

En la Figura 38 se muestra la planta de la catedral de Málaga, con datos relativos a la medida experimental previa realizada para un proyecto fin de máster [80], y la Figura 39 una vista hacia el ábside del interior de la misma. Una vez reelaborado el modelo 3D (se muestra en la Figura 40), se ha calibrado, siguiendo la metodología, ya descrita, implementada para las iglesias gótico-mudéjares, y se ha utilizado para simular el campo acústico interior y obtener los valores de los parámetros acústicos [81] utilizando los nuevos algoritmos de cálculo de Catt-Acoustic [82].

En la Figura 41 se muestran el comportamiento espectral, promediado espacialmente, de EDT y D_{50} , medidos y simulados con los diferentes algoritmos de Catt-Acoustic y TUCT, así como la valoración de la dispersión espacial de los resultados, para las diferentes bandas de octava,

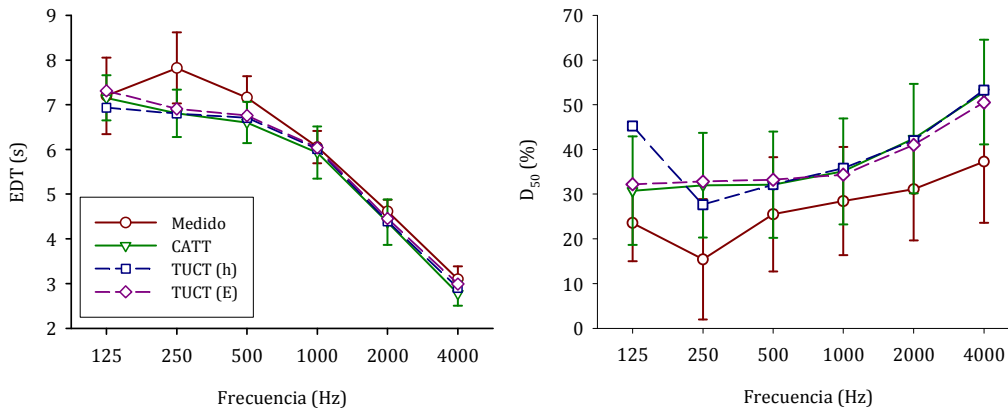


Figura 41. Valores espectrales, promediados espacialmente, para el tiempo de caída inicial y la definición, medidos y simulados. Las barras verticales valoran la dispersión espacial mediante la desviación estándar.

mediante la desviación estándar (barras de error).

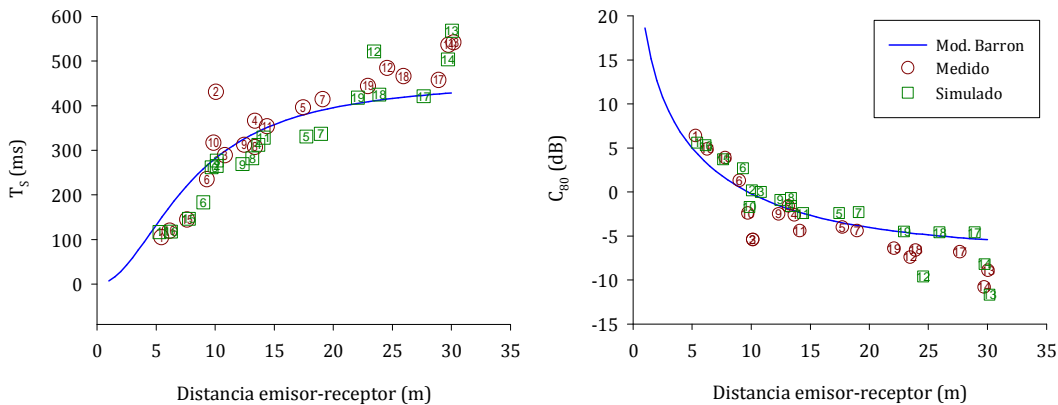


Figura 42. Valores medidos y simulados del tiempo central y de la claridad, para la banda de octava de 1 kHz, frente a la distancia al emisor. Los números identifican cada receptor y la curva corresponde al modelo de Barron.

En la Figura 42 se muestra la dependencia, respecto de la distancia emisor-receptor, del tiempo central y la claridad musical para la banda de octava centrada en 1 kHz; aparecen los valores medidos, los simulados con Catt-Acoustic y, sólo a efectos de referencia, la curva prevista por el modelo de Barron. Está en proceso de investigación la aplicación del modelo analítico μ para estos espacios.

Finalmente, para discutir la fiabilidad de la simulación, en la Figura 43 se muestran las diferencias absolutas entre los valores medidos y los simulados con Catt, para cada uno de los puntos de medida, en las diferentes octavas, para cada parámetro, con indicación de los límites correspondientes a 1 y 2 JND, correspondientes a la situación de espacios muy reverberantes según propuesta de Martellotta [45]. Para una discusión y valoración de estos resultados ver [81].

Transferencia de Resultados

El mismo equipo investigador ha presentado a la convocatoria 2011 de incentivos a los Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento, la solicitud de un proyecto de investigación, complementario del concedido por el Plan Nacional, permitido explícitamente en la citada convocatoria aunque sea para la misma finalidad, que persigue, entre otros, como objetivo fundamental, aumentar la capacidad de transferencia de los resultados del proyecto al tejido social y empresarial, aspecto éste generalmente muy olvidado en los proyectos de investigación realizados desde el ámbito de la Arquitectura.

Por esta razón el proyecto se ha presentado como un “proyecto motriz”. Según la citada orden de incentivos, *“serán calificados así aquellos proyectos que por su aportación de conocimientos estratégicos permitan facilitar y construir relaciones relevantes con el exterior y con las empresas, así como reportar un destacado impulso de la economía, el bienestar y la convivencia en Andalucía”*. Se exige que, al menos el 15% del total adjudicado al proyecto, debe subcontratarse a una empresa privada y ubicarse preferentemente en una de las diez subáreas que fija; una de ellas, en concreto la cuarta, es *“protección del patrimonio histórico y natural”*.

La empresa elegida ha sido Arpa Solutions de Málaga, que está especializada en tecnologías de *realidad aumentada* [83,84,85], y con experiencia previa de aplicación de estas técnicas en aspectos patrimoniales y su puesta en valor en relación con la industria turística. Destaca en ella su carácter tecnológico e innovador y que tiene, entre otros importantes, el premio Spin-Off

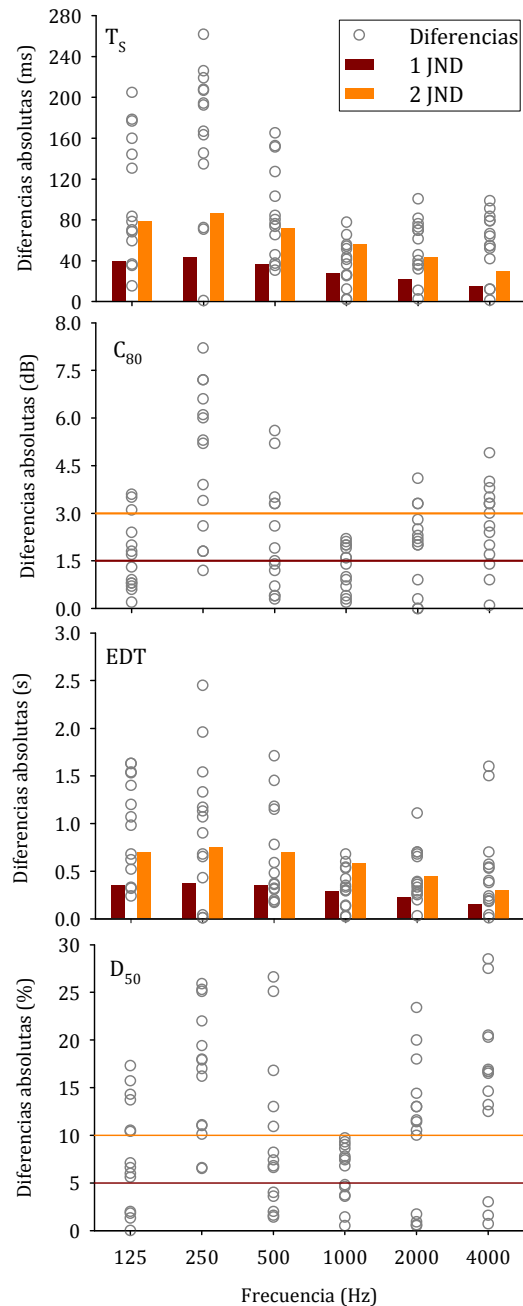


Figura 43. Diferencias absolutas, en cada receptor y para cada banda de octava, entre valores medidos simulados de cada parámetro. En cada caso se indican dos límites en función del respectivo JND.

de la Universidad de Málaga. Nos encontramos así ante un binomio (grupo de la Universidad de Sevilla y empresa originada a partir de la Universidad de Málaga) que se ubica en el entorno del Campus de Excelencia Internacional, Andalucía Tech, que han promovido las citadas universidades. En la estructura conceptual del citado Campus se identifican los denominados “polos de excelencia docente e investigadora” y el presente proyecto incorpora una empresa (Arpa Solutions) relacionada con uno de estos polos: el de las comunicaciones y la movilidad (TIC); y un grupo de investigadores de la Universidad de Sevilla que, desde el carácter interdisciplinar del mismo, aborda un tema patrimonial que tiene una fuerte incidencia en otro de estos polos: el del turismo y el desarrollo territorial.

La participación de la empresa se justifica en la creación de una aplicación de puesta en valor de los resultados intermedios y finales del proyecto de investigación mediante el desarrollo, por parte de ésta, de una solución basada en su plataforma DARAM® de *realidad aumentada* [86]. El objetivo es crear un catálogo virtual, que muestre modelos tridimensionales de algunas de las catedrales andaluzas, y acompañando cada modelo, se reproducirá un “audio aumentado”, obtenido mediante técnicas de auralización por el equipo de investigación del proyecto, que rememore el patrimonio acústico, asociado a los diferentes modelos acústicos de cada una de las catedrales, en función de la época histórica a la que pertenezca, la efemérides auralizada y de las características arquitectónicas.

Cabe también la posibilidad de poder mostrar imágenes de la configuración del mobiliario interior de las diferentes catedrales en una o varias épocas históricas para completar la información descrita en el párrafo anterior, utilizando para ello la representación de imágenes estáticas mediante realidad aumentada, consiguiendo así integrar diferentes aspectos del valor patrimonial de estos espacios.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar su sincero agradecimiento a todos los miembros del grupo de Acústica Aplicada del IUACC por el trabajo compartido durante mucho tiempo. Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2010-20523.

REFERENCIAS

- [1] ORDEN de 3 de septiembre de 2007, por la que se regula el funcionamiento del Registro Electrónico de Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento para los Grupos de Investigación dependientes de las Universidades y Organismos de Investigación ubicados en Andalucía y se establece su financiación (BOJA núm. 187, de 21 de septiembre de 2007).
- [2] A. L. León, J. J. Sendra, J. Navarro, T. Zamareño, “Acústica y Rehabilitación de Teatros en Andalucía”, Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla, Sevilla, (2007).
- [3] A. Giménez, R. M. Cibrián, S. Girón, T. Zamarreño, J. J. Sendra, A. Vela, F. Daumal, “Questionnaire survey to qualify the acoustics of Spanish concert halls”, Acta Acustica united with Acustica (aceptado en julio de 2011).
- [4] J.S. Bradley, “Review of objective room acoustics measures and future needs”, Appl. Acoust., 72, pp. 713-720, (2011).
- [5] <http://server.oersted.dtu.dk/www/oldat/erato/> (visitado el 28 de agosto de 2011).
- [6] Z. Karabiber, “A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project”, Seventh International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, Germany, (2000).
- [7] A. Christoffer, C. Weitze, C. Lynge, J. H. Rindel, A. C. Gade, “Computer Simulation of the Acoustics of Mosques and Byzantine Churches”, 17th International Congress on Acoustics (CD), Roma, (2001).
- [8] <http://server.oersted.dtu.dk/www/oldat/cahrisma/> (visitado el 28 de agosto de 2011).
- [9] J.J. Sendra, J. Navarro, “La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del Paleo-cristiano al tardo-Barroco”, Inst. Univ. de Ciencias de la Construcción, Univ. de Sevilla, Sevilla, (1997).
- [10] J.J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, “Acoustics in churches” (in “Computational Acoustics in Architecture”), Ed. J. J. Sendra, WIT Press, Southampton, pp. 133-177, (1999).
- [11] G. Abraham, “Historia Universal de la Música”, Ed. Taurus, Madrid, (1987), (trad. de “The Concise Oxford History of Music”, Oxford University Press, (1979)).

- [12] W. Oeschlin, A. Buschow, "Architectura de fête. L'Architecture metieur en scène", Pierre Mardaga Ed., Bruselas, (1987).
- [13] O. P. Schnoebelen, "Performance Practices at San Petronio in the Baroque", *Acta Musicologica*, P. XLI, pp. 37-55, (1969).
- [14] A. C. Raes, G. Sacerdote, "Measurement of the acoustical properties of two roman basilicas", *J. Acoust. Soc. Am.*, 25(5), pp. 925-961, (1953).
- [15] W. Lottermoser, "Nachhallzeiten in Barckkirchen", *Acustica*, 2, pp. 109-111, (1952).
- [16] L. Keibs, W. Kuhl, "Akustics der Thomaskirche in Leipzig", *Acustica*, 9, pp. 365-370, (1959).
- [17] R.S. Shankland, H. K. Shankland, "Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome", *J. Acoust. Soc. Am.*, 50(2), pp. 389-396, (1971).
- [18] E. Tzekakis, "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki", *Acustica*, 43, pp. 275-279, (1979).
- [19] E. Tzekakis, "Reverberation time of the Rotunda of Thessaloniki", *J. Acoust. Soc. Am.*, 57, pp. 1207-1209, (1975).
- [20] R.W. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches", *J. Sound Vib.*, 43(3), pp. 562-567, (1975).
- [21] M. Fernández, M. Recuero, C. David, "Church acoustics", *Proceedings of the Forum Acusticum (CD)*, Seville, Spain, September, (2002).
- [22] J. Anderson, J. S. Bratos-Anderson, "St. Paul's Cathedral London, as a concert Hall", 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, Dinamarca, (1999).
- [23] J. Anderson, T. Jacobsen, "RASTI measurements in St. Paul's Cathedral, London", Technical Note, Brüel&Kjaer, Dinamarca, (1985), (disponible en <http://www.bksv.com/doc/BO0116.pdf> el 23 de agosto de 2011).
- [24] T. H. Lewers, J. S. Andderson, "Some acoustical properties of St. Paul cathedral, London", *J. Sound Vib.*, 92(2), pp. 285-297, (1984).
- [25] P. H. Parkin, J. H. Taylor, "Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral - experimental system using line-source loudspeakers and time delays", *Wireless World*, 58, pp. 54-57, (1952).
- [26] P. H. Parkin, J. H. Taylor "Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral - details of the equipment and results of tests", *Wireless World*, 58, pp. 109-111, (1952).
- [27] A. P. O. Carvalho, "Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches", Ph. D. dissertation, Univ. Florida, U.S.A., (1994).
- [28] A. P. O. Carvalho, A. E. J. Morgado, L. Henrique, "Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches", *Journal of the Building Acoustics*, 4(1), pp. 1-20, (1997).
- [29] A. P. O. Carvalho, "Relations between Rapid Speech Transmission Index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches", *Appl. Acoust.*, 58, pp. 33-49, (1998).
- [30] A. Magrini, P. Ricciardi, "An experimental study of acoustical parameters in churches", *International J. Acoustics and Vibration*, 7(3), pp. 177-183, (2002).
- [31] A. Magrini, P. Ricciardi, "Coupling effects in Christian churches: preliminary analysis based on a simple theoretical model and some experimental results", *Proceedings of the Forum Acusticum (CD)*, Seville, Spain, September, (2002).
- [32] A. Magrini, P. Ricciardi, "On the distribution of acoustical parameters: comparison between experimental results in historical Christian churches and theoretical models", 17th International Congress on Acoustics (CD), Roma, (2001).
- [33] A. Magrini, P. Ricciardi, "Churches as auditoria: analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality", *Building Acoustics*, 10, pp. 135-158, (2003).
- [34] V. Desarnaulds, A. P. O. Carvalho, G. Monay, "Church acoustics and the influence of occupancy", *Building Acoustics*, 9(1), pp. 29-47, (2002).
- [35] E. Cirillo, F. Martellotta, "Acoustics of Apulian-Romanesque churches: an experimental survey", *Building Acoustics*, 9(4), pp. 271-288, (2002).
- [36] E. Cirillo, F. Martellotta, "Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustical parameters", *Building Acoustics*, 10(1), pp. 55-76, (2003).
- [37] E. Cirillo, F. Martellotta, "On the measurement of binaural acoustic parameters in some Romanesque churches", *Proceedings of the Forum Acusticum (CD)*, Seville, Spain, September, (2002).
- [38] E. Cirillo, F. Martellotta, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches", *Appl. Acoust.*, 64, pp. 1-23, (2002).
- [39] E. Cirillo, F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches", *J. Acoust. Soc. Am.*, 118(1), pp. 232-248, (2005).
- [40] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches", *J. Acoust. Soc. Am.*, 125(3), pp. 1281-1284, (2009).
- [41] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi, "Guidelines for acoustical measurements in churches", *Appl. Acoust.*, 70(2), pp. 378-388, (2008).
- [42] E. Cirillo, F. Martellotta, "Worship, Acoustics and Architecture", *Multi-Science*, U.K, (2006).
- [43] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome", *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(3), pp. 1175-1186, (2009).

- [44] F. Martellotta, M. D'alba, S. Della Crociata, "Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences", *Appl. Acoust.*, 72, pp. 341-349, (2011).
- [45] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces", *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, pp. 654-663, (2010).
- [46] F. Martellotta, "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches", *J. Sound Vib.*, 317(1-2), pp. 378-399, (2008).
- [47] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, J. J. Sendra, J. Navarro, "Simulated acoustic fields in Mudejar-Gothic churches", 137th Meeting of the ASA and 2nd Convention of the EAA: Forum Acusticum (CD), Berlin, (1999).
- [48] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Gothic-Mudejar churches", *Proceedings of the Forum Acusticum (CD)*, Seville, Spain, September, (2002).
- [49] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches", *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(3), pp. 1207-1218, (2009).
- [50] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, J. Algaba, "El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación", *Inst. Univ. de Ciencias de la Construcción, Univ. de Sevilla*, (1997).
- [51] J. Navarro, J. J. Sendra, "La iglesia como lugar de la música", *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, pp. 381-387, (1996).
- [52] J. Navarro, J. J. Sendra, S. Muñoz, "The Western Latin church as a place for music and preaching: an acoustic assessment", *Appl. Acoust.*, 70(6), pp. 781-789, (2009).
- [53] R. Suárez, J. J. Sendra, J. Navarro, "A proposal to improve the acoustics in Fernandina churches. The example of Magdalena Church in Córdoba" (in "Modelling Experimental Measurements in Acoustics, vol III"), WIT Press, Southampton, pp. 85-94, (2003).
- [54] R. Suárez, J. J. Sendra, J. Navarro, A. L. León, "The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for architectural intervention", *Acta Acustica united with Acustica*, 90(2), pp. 362-375, (2004).
- [55] R. Suárez, J. J. Sendra, J. Navarro, A. L. León, "The sound of the Cathedral-Mosque of Córdoba", *J. Cultural Heritage*, 6(4), pp. 307-312, (2005).
- [56] R. Suárez, J. J. Sendra, J. Navarro J., A. L. León, "Espacios acoplados en la Mezquita-Catedral de Córdoba: el sonido de los límites", *Informes de la Construcción*, 501, pp. 23-31, (2006).
- [57] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, "An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches", (in "Computational Acoustics and its Environmental Applications II", Edit. C. A. Brevia, J. Kenny, R. D. Ciskowski), WIT Press, Southampton, pp. 139-148, (1997).
- [58] M. Barron, L. J. Lee, "Energy relations in concert auditoriums I", *J. Acoust. Soc. Am.*, 84(2), pp. 618-628, (1988).
- [59] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, "La acústica de las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla", *Inst. Univ. de Ciencias de la Construcción, Univ. de Sevilla*, (1999).
- [60] M. Galindo, "La acústica en espacios religiosos católicos: iglesias Gótico-Mudéjares", tesis doctoral (publicada por Editorial Académica Española, disponible en <http://www.morebooks.de>), Univ. de Sevilla, (2003).
- [61] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches", *Building Acoustics*, 6(1), pp. 1-16, (1999).
- [62] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Speech intelligibility in Mudejar-Gothic churches", *Acta Acustica united with Acustica*, 86, pp. 381-384, (2000).
- [63] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results", *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(5), pp. 2873-2888, (2005).
- [64] M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño, "Correlations of the Acoustic fields of Mudejar-Gothic churches", *Building Acoustics*, 15(3), pp. 175-196, (2008).
- [65] S. Girón, M. Galindo, T. Zamarreño, "Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches", *J. Sound Vib.*, 315, pp. 1125-1142, (2008).
- [66] T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo, "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches", *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(1), pp. 234-250, (2007).
- [67] U. Berardi, E. Cirillo, F. Martellotta, "Predicting energy-based acoustic parameters in churches: an attempt to generalize the μ -model", *Acústica-2008 (CD)*, Coimbra, Portugal, (2008).
- [68] U. Berardi, E. Cirillo, F. Martellotta, "A comparative analysis of acoustic energy models for churches", *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(4), pp. 1838-1849, (2009).
- [69] M. Marsilio, N. Prodi, R. Pompoli, "On the effect of floor inside mosques", 17th International Congress on Acoustics (CD), Roma, (2001).
- [70] N. Prodi, M. Marsilio, R. Pompoli, "On the prediction of reverberation time and strength in mosques", 17th International Congress on Acoustics (CD), Roma, (2001).
- [71] N. R. Hammad, "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan", *Appl. Acoust.*, 30, pp. 335-345, (1990).
- [72] M. K. Abdelazeed, R. N. Hammad, A. A. Mustafa, "Acoustics of King Abdullah mosque", *J. Acoust. Soc. Am.*, 90(3), pp. 1441-1445, (1991).
- [73] A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia", *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(3), pp. 1505-1517, (2003).

- [74] R. Suárez, "El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico", tesis doctoral, E. T. S. de Arquitectura, Univ. de Sevilla, (2002).
- [75] T. Zamarreño, J. Algaba, F. J. Nieves, M. Galindo, "Aspectos acústicos en la rehabilitación del salón de plenos del Parlamento Andaluz. Viabilidad de una simulación por ordenador", Tecniacústica-95, La Coruña, Revista de Acústica, Nº extraordinario, octubre, (1995).
- [76] S. Muñoz, J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, "Resultados de la corrección acústica de un recinto eclesial tras su rehabilitación como espacio escénico", (CD), Acústica-2004, Guimarães, Portugal, (2004).
- [77] J. J. Sendra, J. Navarro, T. Zamarreño, A. León, "Propuestas para la rehabilitación acústica de iglesias: el ejemplo de la iglesia de S. Francisco de Baeza (España)", IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Actas del congreso, pp. 244-245, La Habana, Cuba, (1998).
- [78] A. C. Gade, "The influence of architectural design on the acoustics of concert halls," Appl. Acoust., 31, pp. 207-214, (1990).
- [79] T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo, "Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches", Appl. Acoust., 69, pp. 242-254, (2008).
- [80] L. Álvarez, "Estudio Acústico de la Catedral de Málaga", proyecto final del máster de Gestión y Evaluación de la Contaminación Acústica (Ingeniería Acústica), Universidad de Granada, (2011).
- [81] L. Álvarez, A. Alonso, T. Zamarreño, S. Girón, and M. Galindo, "Virtual Acoustics of the Cathedral of Malaga (Spain)", (CD), Forum Acusticum, Aalborg, Denmark, (2011).
- [82] B. I. Dalenbäck, "CATT-Acoustic v8h, user's manual. Room acoustics prediction and walkthrough auralization", (2008); and "CATT TUCT v1.0f user's manual", Gothenburg (Sweden), Computer Aided Theatre Technique, (2010).
- [83] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre, "Recent advances in augmented reality", IEEE, Computer Graphics and Applications, 21(6), pp. 34-47, (2001).
- [84] A. Ruiz-Aguilar, C. Urdiales, J. A. Fernández-Ruiz, F. Sandoval, "Sistema CAD avanzado mediante realidad aumentada", XIV Jornadas Telecom I+D 2004, Madrid, noviembre, (2004).
- [85] C. Urdiales, M. Domínguez, C. Trazegnies, F. Sandoval, "A new pyramid-based color image representation for visual localization", Vision Computing, 28(1), pp. 78-91, (2010).
- [86] <http://www.arpa-solutions.net/> (visitada el 28 de agosto de 2011).