



## SIMULACIÓN ACÚSTICA Y VIRTUALIZACIÓN EN RECINTOS DE CULTO

Referencia PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka.

**Zamarreño, Teófilo; Galindo, Miguel; Girón, Sara**

*Dpto. Física Aplicada, I.U.A.C.C., E. T. S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla,  
Avda. Reina Mercedes, 2, 41012 - Sevilla, Spain.  
E-Mail: [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es); [mgalindo@us.es](mailto:mgalindo@us.es); [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es)*

### ABSTRACT

Acoustic simulation methods applied to existing places of worship enable to use calibrated models to simulate the inner acoustic field with enough accuracy. It is possible to obtain adequate spectral and spatial behaviour of the most common room acoustic parameters, and even to obtain simulated impulse responses that can be used to do auralizations with subjective assessment purposes, either reconstruction of acoustic intangible heritage associated, or prior recreation of the behaviour before any permanent or ephemeral interventions. The implementation of these methods and the iterative process to obtain calibrated models, to be applied with the objectives proposed to a set of very significant Mudéjar-Gothic churches of the city of Seville are shown.

### RESUMEN

Los métodos de simulación acústica aplicados a lugares de culto existentes permiten disponer de modelos calibrados para simular con suficiente precisión el campo acústico interior, tanto en términos del comportamiento espectral y distribución espacial de los parámetros acústicos habituales, como, incluso para utilizar las respuestas al impulso simuladas para implementar auralizaciones con fines de evaluación subjetiva, reconstrucción del patrimonio inmaterial acústico asociado o recreación previa del comportamiento ante posibles intervenciones permanentes o efímeras. Aquí se presenta la aplicación de estos métodos, y el procedimiento iterativo de calibración de los modelos con los objetivos planteados, a un conjunto de iglesias Gótico-Mudéjares muy significativas de la ciudad de Sevilla.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos computacionales [1] basados en la acústica geométrica aparecen por primera vez alrededor de 1967 y hasta la década de los 90 han ido madurando hasta alcanzar hoy una eficiencia capaz de proporcionar resultados próximos a las condiciones acústicas reales en recintos. Gracias al incremento de la velocidad de cálculo, la mejora del equipamiento tecnológico y el desarrollo de nuevos algoritmos y métodos de análisis, estas técnicas pueden proporcionar resultados fiables a pesar de las limitaciones inherentes al modelo geométrico. Los algoritmos más recientes pueden producir respuestas al impulso (RI) binaurales ( $h_L$  y  $h_R$ ) que permiten la implementación de auralizaciones [2] de alta calidad o, incluso, en formato B-format ( $h_w$ ,  $h_x$ ,  $h_y$  y  $h_z$ ) [3] que permiten obtener una fiable información espacial en cada receptor y sintetizar patrones polares de otros tipos de micrófono. Como la base computacional

de estos algoritmos es la técnica del trazado de rayos o acústica geométrica, resulta un método especialmente apropiado de análisis para el rango de alta frecuencia (teóricamente por encima de cuatro veces la frecuencia de Schroeder), pero con limitaciones en la región de baja frecuencia. Dicha frecuencia de corte viene dada por:

$$f_s = \sqrt{\frac{c^3 T}{8,8V}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}},$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido,  $T$  el tiempo de reverberación (suele usarse el valor medio de las octavas centradas en 500 y 1000 Hz) y  $V$  el volumen del recinto. Podemos observar que cuanto más sorda sea la sala menor será esta frecuencia, y por tanto mayor el rango de validez del método. Sin embargo, debido a la falta de consideración del carácter ondulatorio del sonido propagándose en el recinto, los resultados que se obtienen no son completamente satisfactorios [2]. Una forma de recuperar alguno de los efectos asociados a este carácter ondulatorio es la introducción de un coeficiente de dispersión (o scattering) asociado a cada superficie y que, como sucede con los de absorción, pueden ser dependientes de la frecuencia. De esta manera las reflexiones producidas en los contornos del espacio pasan de exhibir un comportamiento puramente especular a ser parcialmente difusas.

Se dispone de evidencias suficientes de que todas las superficies requieren la incorporación de un coeficiente de dispersión apropiado [4,5] para que los resultados simulados describan adecuadamente las condiciones reales del espacio. La principal dificultad aparece ante la falta de datos experimentales fiables de estos coeficientes para los diferentes materiales, aunque se está avanzando en este sentido [2,5-10] para identificar estos valores, tanto en el laboratorio como *in situ*. Además ya se dispone de procedimientos normalizados [11] para la medida de estos coeficientes.

Así mismo, hay que considerar que un modelo geométrico muy detallado no produce necesariamente una mayor precisión en los resultados de los parámetros [3,5]. Como regla general [2,3], detalles geométricos cuya dimensión característica sea inferior a 0.5 m se pueden ignorar. Es mucho más importante describir las propiedades acústicas de las superficies (mediante los respectivos coeficiente de absorción y dispersión), para los que, en muchas ocasiones, no se dispone de datos con una aproximación adecuada.

Se han desarrollado diversos algoritmos para implementar la propagación de la energía acústica en el interior de un recinto mediante técnicas de acústica geométrica. El primero de ellos utilizado en el diseño de auditorios fue el de trazado de rayos [12]. Se basa en el trazado y seguimiento de los rayos sonoros desde un punto del recinto, que actúa como fuente sonora, hasta que alcanzan el punto de recepción, siguiendo las mismas leyes que los rayos luminosos en la óptica geométrica, y considerando en su propagación hasta un determinado orden de reflexiones. Este modelo permite incorporar los efectos de la dispersión. El mayor inconveniente de esta técnica surge del hecho del gran número de rayos necesarios para recubrir adecuadamente un recinto normal, lo que provoca un incremento en el tiempo de cálculo cuando se ha de evaluar el camino recorrido por cada rayo para cada una de las bandas de octava de interés. El método fue posteriormente mejorado [13] y el camino de cada rayo se ha convertido en un cono [14] o en una pirámide triangular [15].

Como alternativa, el algoritmo de las fuentes imagen se puede utilizar para generar un ecograma considerando la intensidad asociada con cada reflexión y el retardo de su llegada al receptor respecto del sonido directo. Cuando el número de superficies crece arbitrariamente, el número de posibles imágenes aumenta exponencialmente con el orden máximo de las reflexiones considerado, dando como resultado un modelo complejo, como ocurre en las salas de concierto y, más aún, en los espacios de culto. La gran ventaja de este algoritmo es su carácter determinista en la generación de la respuesta impulsiva. Por otra parte, su gran inconveniente es su enorme coste computacional. Por ello, se utiliza solamente para implementar la primera parte de la respuesta al impulso, que resulta de la máxima importancia para la correcta percepción de las características del correspondiente campo sonoro.

En 1989, Vorländer [16] presentó el primer algoritmo híbrido en un intento de combinar las ventajas de los algoritmos anteriores y limitar la incidencia de sus inconvenientes. Consiste en encontrar imágenes que tienen una alta probabilidad de ser válidas mediante el trazado de la distribución de los rayos desde la fuente y considerar aquellas superficies que tienen resultados válidos. El número de rayos utilizado, necesariamente finito, proporciona un ecograma de longitud temporal limitada y con deficiencias de energía, pues al ser finito el número de rayos lanzados no se consideran todas las posibles fuentes imagen. Es por ello necesario utilizar otros métodos (generalmente estadísticos) para contabilizar el resto de las contribuciones, permitiendo así generar la *cola* de la respuesta al impulso integrada. Estas técnicas se han aplicado por algunos autores en salas de concierto [17], teatros, algunos de ellos con una tipología similar [18], en mezquitas [19], y también en el estudio de los antiguos teatros griegos y romanos al aire libre [20].

## 2. LAS IGLESIAS GÓTICO MUDÉJARES SEVILLANAS

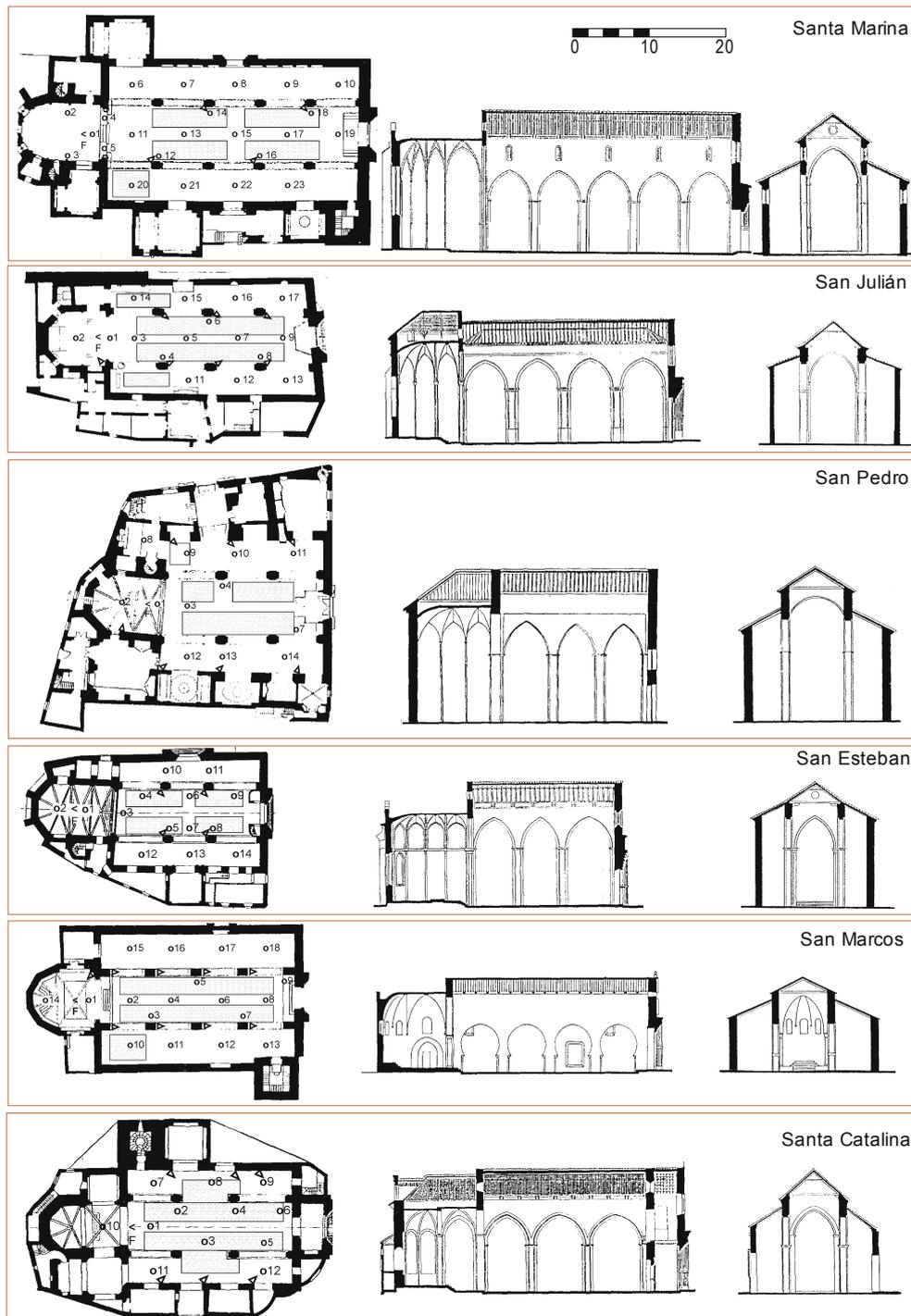
Se analizaron acústicamente doce iglesias de la misma tipología, pero con diferentes volúmenes, dimensiones, acabados interiores y mobiliario, [21]. Todas ellas fueron construidas en la Edad Media, y su estilo arquitectónico es el resultado de un movimiento artístico español único, el mudéjar, que muestra influencias góticas, islámicas y cristianas.

Las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla, todas ellas ubicadas en su centro histórico, se caracterizan morfológicamente por este dualismo estilístico: un ábside gótico abovedado y un cuerpo de tres naves con cubierta de madera (de par y nudillo en la nave principal) de origen árabe. Sus paredes de ladrillo se complementan con portadas y ábside de piedra. Los apoyos son también claramente islámicos, con pilares cuadrangulares u octogonales y con molduras de ladrillo como decoración. Arcos apuntados, de medio punto o segmentados descansan sobre estos soportes. Una descripción completa de las terminaciones y otra información acústica se puede ver en [21].

Se eligieron seis de estas iglesias para ser simuladas acústicamente [22]. En orden decreciente de volumen fueron la de Santa Marina (MN), San Julián (JU), San Pedro (PE), San Esteban (ES), San Marcos (MC) y Santa Catalina (CA). En la Fig. 1 se muestran las plantas (se indican las posiciones de fuentes y receptores utilizadas en las medidas y las simulaciones) y secciones longitudinal y transversal de cada una de ellas y en la Fig. 2 vistas del interior de las seis iglesias.

Fueron varias las razones para la elección de esta muestra. La primera es que pertenecen a dos grupos diferentes en cuanto a los valores de sus tiempos de reverberación: las de Santa Marina y San Marcos están en el primer grupo, con valores más altos, que superan los óptimos propuestos por Knudsen *et al.* [23]. Las restantes iglesias, por el contrario, presentan tiempos de reverberación cortos que dan mejores condiciones para la voz y el uso musical.

La segunda razón fue considerar toda la gama de volúmenes. En este sentido el mayor volumen (10708 m<sup>3</sup>) es el de la Iglesia de Santa Marina; los valores intermedios corresponden a San Julián (6226 m<sup>3</sup>) y San Pedro (6180 m<sup>3</sup>) y los de San Esteban (4746 m<sup>3</sup>), San Marcos (4623 m<sup>3</sup>) y Santa Catalina (4362 m<sup>3</sup>), se asocian a las iglesias más pequeñas de la muestra. Cabe destacar que la iglesia de San Marcos se encuentra entre las que tienen un tiempo de reverberación alto, aun teniendo uno de los volúmenes más pequeños.



**Figura 1.** Plantas y secciones longitudinales y transversales de las iglesias simuladas. En la planta se indican las posiciones de la fuente (F), de los receptores (O), de los altavoces del sistema electroacústico existente (>) y la distribución de los bancos (rectángulos sombreados).

La tercera razón tiene que ver con el acabado superficial. En este sentido, tenemos dos iglesias (Santa Marina y San Marcos) que presentan escasa decoración en sus paredes y el mobiliario presente queda prácticamente limitado a los bancos de madera ubicados en la nave central para acoger a los fieles; las demás están considerablemente más adornadas y encontramos, además, retablos de madera en el altar principal, así como pinturas, esculturas y elementos textiles. En las iglesias de San Esteban y Santa Marina, las paredes están hechas a base de ladrillo de taco con gruesas juntas de mortero, mientras que en las otras cuatro las paredes de ladrillo han sido enlucidas y pintadas o directamente pintadas. En San Julián y San Pedro, tanto los muros perimetrales como las bases de los pilares, están acabados con un

**Tabla 1.** Coeficientes de absorción,  $\alpha$  (arriba), y de dispersión,  $\delta$  (abajo), de los principales materiales utilizados en las simulaciones.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Cubierta de madera (CM)	0.30	0.29	0.24	0.21	0.20	0.21
	0.50	0.60	0.70	0.70	0.80	0.80
Mármol y azulejos cerámicos (MA)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
	0.10	0.10	0.10	1.10	0.10	0.10
Bancos (BA)	0.16	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Madera (MD)	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Retablo (RE)	0.32	0.28	0.27	0.27	0.20	0.17
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Ladrillo visto (LV)	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Terciopelo (TE)	0.02	0.04	0.08	0.20	0.35	0.40
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Suelo de bloques cerámicos (BC)	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de MN (ladrillo de taco con gruesas juntas de mortero) (PMN) <sup>a</sup>	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de JU (ladrillo enlucido y pintado con algunos cuadros al óleo) (PJU) <sup>a</sup>	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de PE (ladrillo enlucido y pintado con muchos cuadros al óleo, altares y esculturas de madera) (PPE) <sup>a</sup>	0.18	0.16	0.14	0.13	0.15	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Paredes de ES (ladrillo visto con gruesas juntas de mortero y muchos cuadros al óleo) (PES) <sup>a</sup>	0.14	0.12	0.13	0.15	0.19	0.21
	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50
Paredes de MC (ladrillo pintado) (PMC) <sup>a</sup>	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07	0.07
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Paredes de CA (ladrillo enlucido y pintado con algunos cuadros al óleo) (PCA) <sup>a</sup>	0.13	0.15	0.16	0.13	0.11	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

<sup>a</sup>Coeficientes de absorción estimados mediante el proceso iterativo de calibración del modelo. Los demás coeficientes de absorción se han tomado de [2,8,24] y a partir de datos de informes internos. Los coeficientes de dispersión se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades de las superficies [2,4].

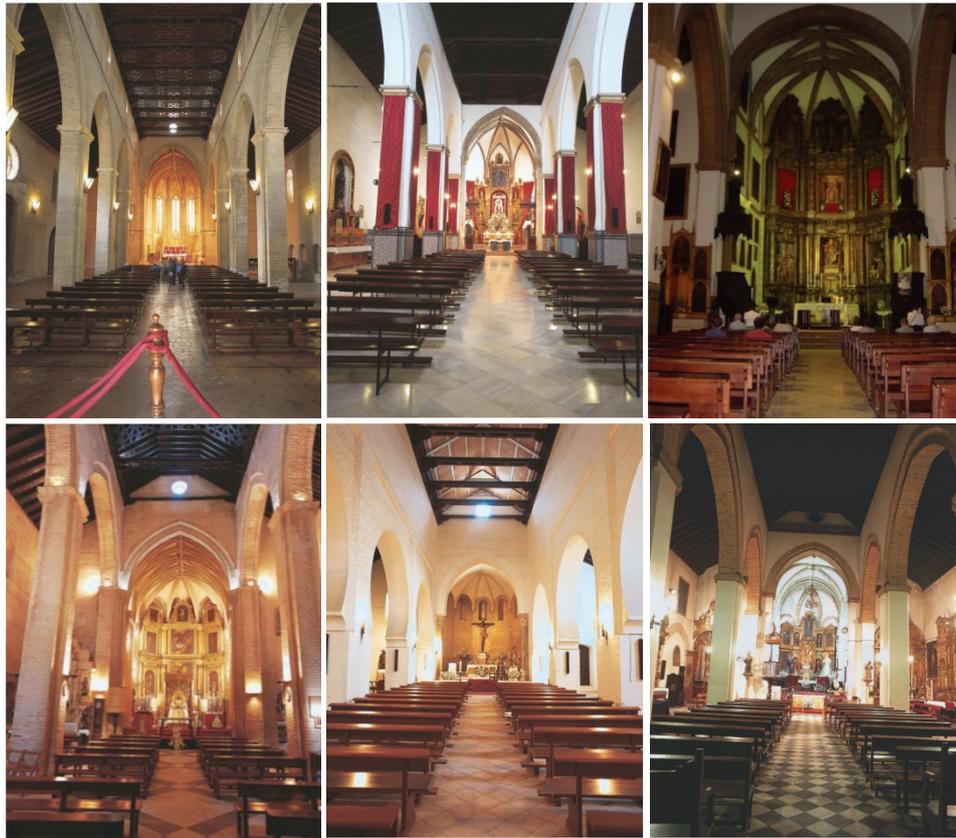
aplicado cerámico que alcanza una altura de unos 2 m. En la Iglesia de San Marcos, el techo de madera de la nave central fue destruido por un incendio y ha sido sustituido por rasillones cerámicos sustentados por correas metálicas. En la Iglesia de San Pedro las tablas de madera de los techos de las naves laterales han sido sustituidas por azulejos cerámicos. Estos detalles se resumen en la Tabla 1 y se pueden apreciar en las Figs. 1 y 2.

### 3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las medidas *in situ* se realizaron, con las iglesias vacías, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ISO 3382 [25] y en la IEC 60268-16 [26]. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante las mediciones: el rango de variación, para todas las iglesias, fue 22.6-27.4 °C para la temperatura, 35.7%-65.7% para la humedad relativa y 101.7-102.5 kPa para la presión atmosférica.

Se registraron las respuestas al impulso, y otras señales estacionarias, para determinar, para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4000 Hz, y en todas las posiciones de recepción, entre otros, los siguientes parámetros: tiempo de reverberación  $T$ ; fuerza sonora  $G$ ; tiempo central  $T_S$ ; definición y claridad,  $D_{50}$  y  $C_{80}$ , como parámetros energéticos relacionadas con la proporción de energía temprana/tardía; fracción de energía lateral precoz  $J_{LF}$ , relacionada con la impresión espacial en estos lugares; y por último, el índice RASTI para evaluar la inteligibilidad a partir de la degradación de la función de transferencia de modulación.

Para obtener las RI se utilizaron señales de secuencias de máxima longitud (MLS) [27] generadas y analizadas mediante el analizador MLSSA. La fuente omnidireccional (B&K 4296) se colocó en el punto más habitual de ubicación de la fuente natural: el altar a una altura de 1.70 m del suelo. El micrófono (omnidireccional B&K 4190 de ½" o el multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5) se colocó aproximadamente a la altura de la cabeza de una persona



**Figura 2.** Interior de las iglesias, de izquierda a derecha y de arriba a abajo, de Santa Marina, San Julián, San Pedro, San Esteban, San Marcos y Santa Catalina

sentada (1.20 m desde el suelo), en un número predeterminado de posiciones distribuidas en la nave central y en las laterales, que van desde los 12 receptores para la iglesia de Santa Catalina hasta los 23 en la de Santa Marina (ver Fig. 1).

Para obtener la fuerza sonora se utilizó una señal estacionaria de banda ancha mediante una fuente calibrada y se comprobó la equivalencia de estos resultados con los obtenidos a partir de las señales MLS analizadas con MLSSA [21].

El ruido de fondo se midió promediando temporalmente durante unos 6 minutos en uno o dos puntos representativos de cada iglesia, evitando la proximidad a las puertas de acceso u otras potenciales fuentes perturbadoras.

Los valores del índice RASTI se midieron utilizando el sistema B&K 3361, que utiliza la técnica de ruido estacionario modulado, y se constató la equivalencia de estos resultados con los obtenidos a partir de las RI registradas utilizando señales MLS con niveles y espectros adaptados en la emisión [21].

Para caracterizar la distribución espacial de los parámetros acústicos mencionados, cada uno se promedió espectralmente como sigue:

- Claridad: media directa de los valores en las octavas de 500, 1000 y 2000 Hz.
- Definición: media ponderada según la propuesta de Marshall [28] para  $C_{50}$ ,  
$$D_{50av} = 0.15D_{50}(500 \text{ Hz}) + 0.25D_{50}(1 \text{ kHz}) + 0.35D_{50}(2 \text{ kHz}) + 0.25D_{50}(4 \text{ kHz})$$
- Tiempo de reverberación, tiempo central y fuerza sonora: media de los valores correspondientes a las octavas centradas en 500 y 1000 Hz [29].
- Fracción de energía lateral precoz: valor medio de las octavas de 125, 250, 500 y 1000 Hz [30].

## 4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y DISCUSIÓN

### 4.1. Aspectos generales

Se utilizó el software CATT-ACOUSTIC que, al configurar el cálculo detallado completo, hace uso del algoritmo de trazado de conos con corrección estadística de la cola, que combina características del trazado especular de conos, trazado de rayos estándar y del algoritmo de las fuentes imagen. Este método de predicción permite el cálculo de los valores numéricos para los parámetros acústicos de la sala y la producción de ecogramas que pueden ser utilizados en los procesos de auralización. Para mitigar sus inconvenientes, el sonido directo, las reflexiones de primer orden, tanto especulares como difusas, y las especulares de segundo orden, al menos, se tratan de forma determinista mediante el algoritmo de las fuentes imagen.

En las simulaciones realizadas se hizo uso de un proceso de calibración que no es posible implementar para nuevas construcciones, ya que se basa en un ajuste de los valores de los coeficientes de absorción de los materiales que no aparecen en la literatura y cuya medición, en el laboratorio o *in situ*, es excesivamente compleja. Este proceso se lleva a cabo mediante un procedimiento iterativo cuyo objetivo final es que los valores simulados del tiempo de reverberación, espacialmente promediados, no difieran de los medidos *in situ*, en cada una de las bandas de octava, en más de un 5% en cada iglesia. Este límite se basa en el umbral de percepción (JND) ampliamente aceptado [5,30]. Puesto que CATT-ACOUSTIC ofrece la posibilidad de evaluar los valores de estos tiempos de reverberación de forma interactiva trazando un reducido número de rayos, el procedimiento de ajuste no requiere necesariamente una simulación completa en las primeras etapas de elaboración del modelo. Sin embargo, debido a la particularidad de este tipo de recintos, es siempre conveniente lanzar una simulación completa por si se hace necesario un ajuste final de los coeficientes.

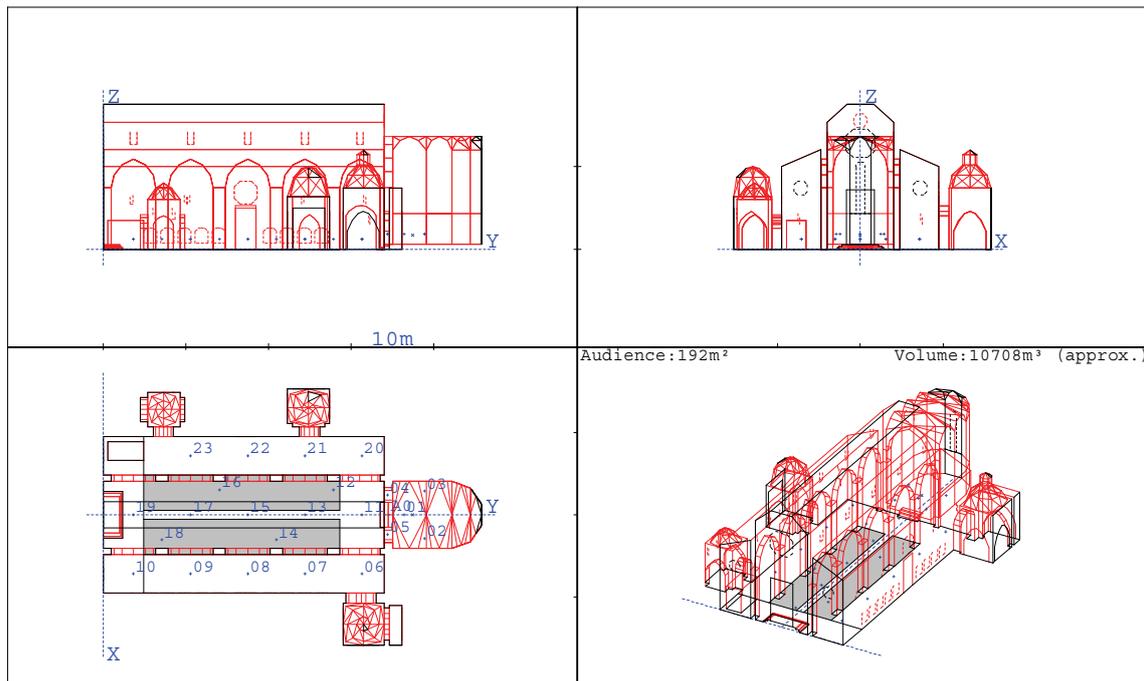
Aunque este proceso de calibración tiene el inconveniente de que es necesario realizar una medida previa, en el caso de un recinto existente, especialmente si posee carácter patrimonial, puede facilitar la evaluación de forma fiable de los procesos de mantenimiento, restauración o acondicionamiento para nuevos usos, y también facilita la recreación del ambiente acústico de épocas pretéritas. Cuando las técnicas de simulación se aplican al caso de recintos de nueva planta se tiene la ventaja, como contrapartida, de que en la elección de las terminaciones se puede optar por materiales cuyos coeficientes de absorción sean conocidos de antemano.

Las condiciones ambientales existentes durante las medidas *in situ* se utilizaron como datos de entrada en los procesos de simulación. Estas variables físicas ejercen influencia sobre la determinación de la velocidad del sonido (y por lo tanto, sobre los retardos relativos de las diferentes reflexiones al construir los ecogramas) y en la estimación de la absorción sonora del aire interior de las iglesias.

El espectro del ruido de fondo medido en cada caso también se utilizó como dato de entrada al simular el comportamiento acústico de las iglesias. Su incidencia es especialmente importante para calcular los valores del índice de inteligibilidad STI. La fuente sonora se eligió de forma que los niveles de emisión se ajustaran en cada caso con los utilizados en las medidas experimentales, con el fin de comparar los valores del nivel de presión medidos y simulados cuando la fuente emite de forma estacionaria. No se realizaron modificaciones especiales para simular las desviaciones del patrón omnidireccional de la fuente utilizada en las medidas, de modo que, en las simulaciones se ha utilizado la fuente omnidireccional predefinida en el software.

Puesto que una de las fuentes de posibles errores al comparar los datos experimentales y los simulados es la variación en la localización de los receptores entre el recinto real y el modelo implementado, se prestó especial cuidado para minimizar, en lo posible, estas diferencias. La Tabla 2 presenta los valores medios de las diferencias absolutas entre las distancias fuente-receptor medidas (obtenidas a partir del tiempo de vuelo del sonido directo desde la fuente hasta el receptor y la velocidad del sonido corregida para la temperatura medida) y las simuladas, proporcionadas por el software, y sus desviaciones estándar para todas las iglesias. Estas diferencias varían entre los 0.08 m para la Iglesia de San Julián y los 0.21 m para la de

Santa Catalina y, por tanto, en todos los casos, son inferiores a la distancia que separa asientos contiguos.



**Figura 3.** Secciones longitudinal y transversal (arriba), planta y perspectiva 3D (abajo) del modelo computacional elaborado para la iglesia de Santa Marina.

Para no forzar los parámetros de simulación en los distintos modelos, se aceptaron las autoestimaciones del programa, tanto para el número de rayos como para el tiempo de truncado, seleccionando las correspondientes opciones ("autonumber" y "autotime") al configurar el software para el proceso de cálculo completo, a condición de que el tiempo de truncado cumpliera el requisito de ser del orden del tiempo de reverberación. En la Tabla 3 se muestran los valores de estos parámetros para las seis iglesias simuladas. En la versión de CATT-ACOUSTIC utilizada se implementaba una nueva opción para el cálculo detallado de la parte final de la respuesta al impulso [31]. La nueva opción difiere sólo en la evaluación de la parte final de los ecogramas donde se utiliza el trazado aleatorio de rayos en lugar del RTC. La ventaja es que no es necesaria ninguna corrección de la cola y, por tanto, se puede prescindir de las hipótesis acerca del crecimiento de la densidad de las reflexiones, lo que supone la posibilidad de simular con precisión recintos de formas inusuales o con espacios acoplados. El coste a pagar es que se tiene un mayor error aleatorio en la parte final y por lo tanto se ha de utilizar un mayor número de rayos (el número de rayos generado automáticamente es el doble que para el RTC). Sin embargo, la nueva variante del algoritmo es más rápida, dando como resultado un tiempo de cálculo total aproximadamente igual que con el RTC. Esta opción se utilizó en las tres iglesias marcadas en negrita en la Tabla 3.

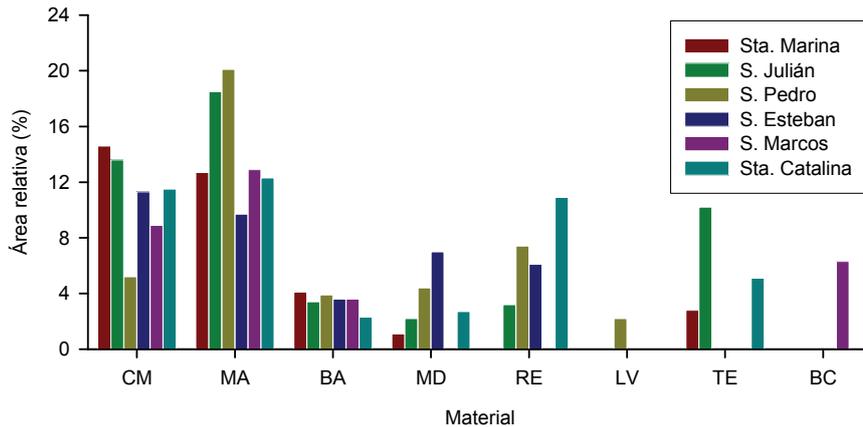
Para las simulaciones todas las superficies de las iglesias se han caracterizado, para cada banda de octava, con su correspondiente coeficiente de dispersión, estimado a partir del tamaño de sus irregularidades (ver Tabla 1). El valor por defecto del programa se ajustó a 0.1.

**Tabla 2.** Valores medios de las diferencias absolutas entre distancias fuente-receptor medidas y simuladas (m) y la desviación estándar, para cada iglesia.

Iglesia	Diferencias	Desviación est.
Santa Marina	0.13	0.16
San Julián	0.08	0.07
San Pedro	0.09	0.07
San Esteban	0.10	0.08
San Marcos	0.11	0.08
Santa Catalina	0.21	0.14

**Tabla 3.** Parámetros usados en las simulaciones. En negrita los calculados con el nuevo algoritmo.

Iglesia	Nº de rayos	Tiempo de truncado $t_r$ (s)
Santa Marina	48412	2.93
San Julián	<b>72122</b>	2.68
San Pedro	<b>56702</b>	2.1
San Esteban	30590	1.95
San Marcos	37664	3.71
Santa Catalina	<b>51440</b>	1.63



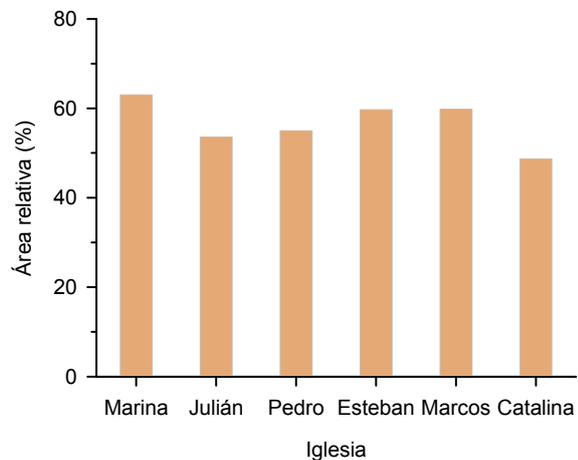
**Figura 4.** Porcentaje del área total para los principales materiales utilizados en los modelos acústicos de las iglesias (excepto los ajustados en el proceso iterativo). Las categorías del eje horizontal identifican cada material con el acrónimo asignado en la Tabla 1.

## 4.2. Resultados de las simulaciones

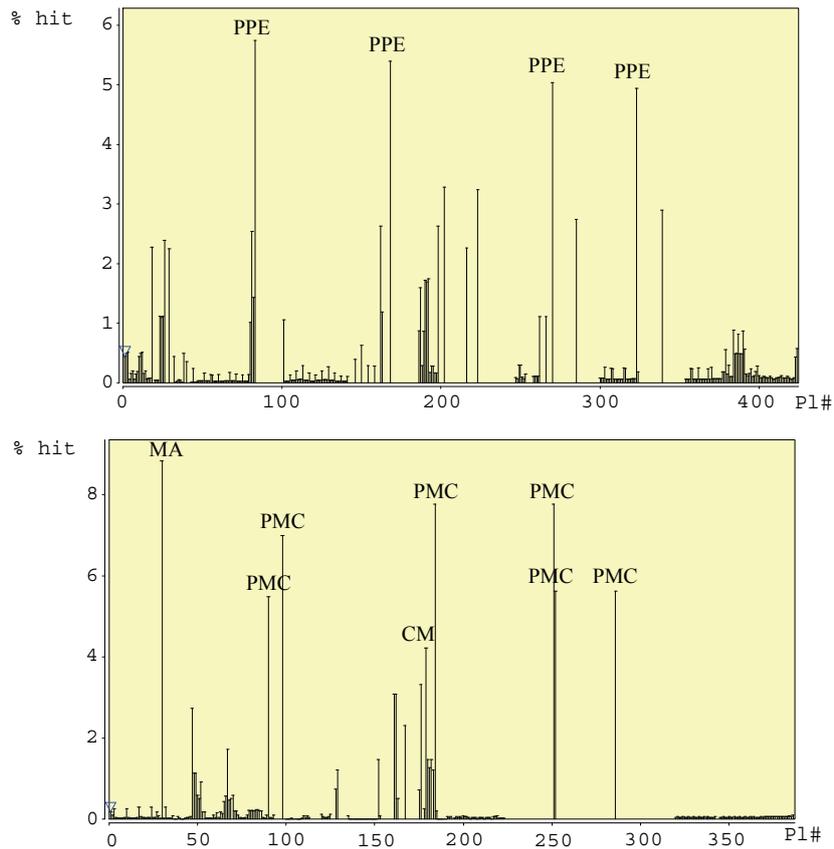
A modo de ejemplo de todos ellos, la Fig. 3 exhibe las secciones longitudinal y transversal, la planta al nivel de la audiencia y una vista en perspectiva del modelo elaborado para la Iglesia de Santa Marina. En la planta se muestran la ubicación de los receptores, la de la fuente, junto al altar mayor en consonancia con las condiciones habituales de la liturgia, y la zona de ubicación de los fieles (en gris). También aparecen los valores del volumen total y de la superficie del área de audiencia; así como una escala gráfica para dar una idea de las dimensiones de la iglesia.

En la Tabla 1 se presentan los principales materiales, con sus respectivos coeficientes de absorción y dispersión para cada una de las bandas de octava, utilizados en los modelos computacionales. En las Figs. 4 y 5, se puede ver el porcentaje del área de cada material presente en cada iglesia. La mayoría de los materiales interiores (mostrados en la Tabla 1) tienen coeficientes de absorción que son bien conocidos [2,8,24]. Los de las cubiertas de madera y los de los retablos se han evaluado a partir de informes internos. Por tanto la estimación mediante el proceso iterativo se aplica a las paredes laterales (mostradas en la Fig. 5) de las tres naves de las iglesias (excluyendo el zócalo cerámico presente en las iglesias de San Julián y San Pedro). Las iglesias estudiadas presentan diferentes acabados en sus paredes, con cuadros, altares y decoraciones varias, estableciéndose así las diferencias en los coeficientes acústicos y en su comportamiento frente a frecuencia. El coeficiente de dispersión de las superficies, que es el menos investigado, se estimó a partir del tamaño de las irregularidades. La estructura superficial se describe en términos de la profundidad y longitud media de sus irregularidades [2,4,10]. La Tabla 1 proporciona una descripción aproximada de estas paredes para una mejor comprensión de los coeficientes obtenidos.

El programa permite valorar la importancia relativa de las diferentes superficies mediante un histograma interactivo donde se presentan los impactos en cada una de ellas. La Fig. 6 muestra esta valoración para cada uno de los planos de las iglesias de San Pedro y San Marcos identificados por los descriptores asignados a los mismos en el modelo. Los materiales de los planos con una puntuación superior al 4% se identifican con las siglas asignadas en la



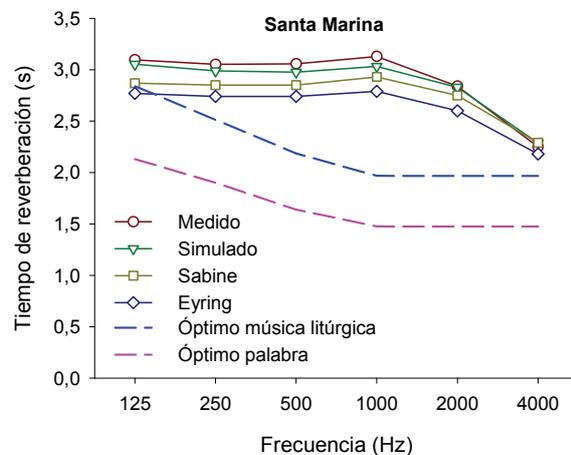
**Figura 5.** Porcentaje del área total, para las superficies ajustadas en el proceso iterativo de cada iglesia.



**Figura 6.** Histogramas de reflexiones producidas en las superficies (identificadas por el número asignado en el modelo): para la iglesia de San Pedro (arriba) y la de San Marcos (abajo). Los materiales de las superficies más significativas (con un porcentaje superior al 4%) se identifican en cada caso con el acrónimo asignado en la Tabla 1.

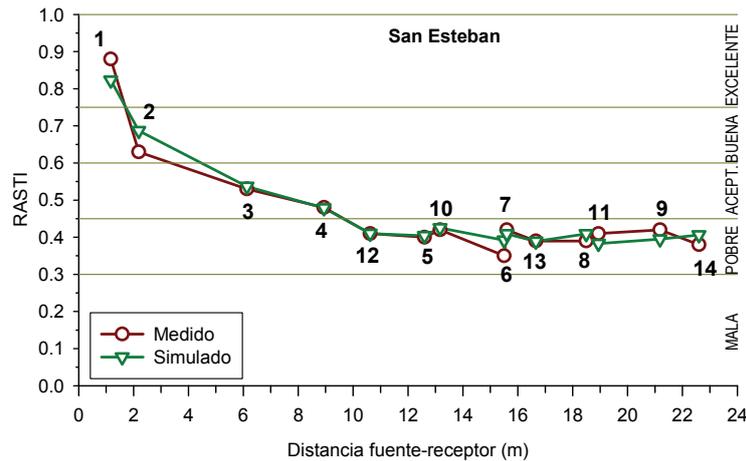
Tabla 1. Las contribuciones más importantes en todos los casos (sumando las puntuaciones de los diferentes planos con el mismo acabado acústico) son el techo de madera, el suelo y las paredes laterales longitudinales de las tres naves.

Para comparar los resultados de los descriptores acústicos simulados y medidos *in situ*, en la Fig. 7 observamos los tiempos de reverberación, para cada una de las bandas de octava para la Iglesia de Santa Marina. Se han incluido los valores del tiempo de reverberación de Sabine y Eyring, así como las curvas tonales recomendables para música y voz sugeridas por Knudsen *et al* [23]. El tiempo de reverberación de Sabine se ha estimado a partir de los datos del área de cada superficie y de sus correspondientes coeficientes de absorción. El de Eyring se estima a partir del recorrido libre medio, calculado a partir de todos los segmentos de rayo, y el coeficiente de absorción medio, evaluado como la media aritmética de todos los valores de absorción encontrados por los rayos.



**Figura 7.** Tiempo de reverberación en bandas de octava: medido, simulado y calculados en la iglesia de Santa Marina. Los valores óptimos se muestran a efectos comparativos.

En todas las bandas, los valores simulados del tiempo de reverberación difieren menos del 5% de los medidos *in situ* tras el



**Figura 8.** Comparación de los valores medidos y simulados del índice RASTI en distintas posiciones de la iglesia de San Esteban: receptores 1 y 2 en el presbiterio, 3-9 en la nave central y 10-14 en las naves laterales.

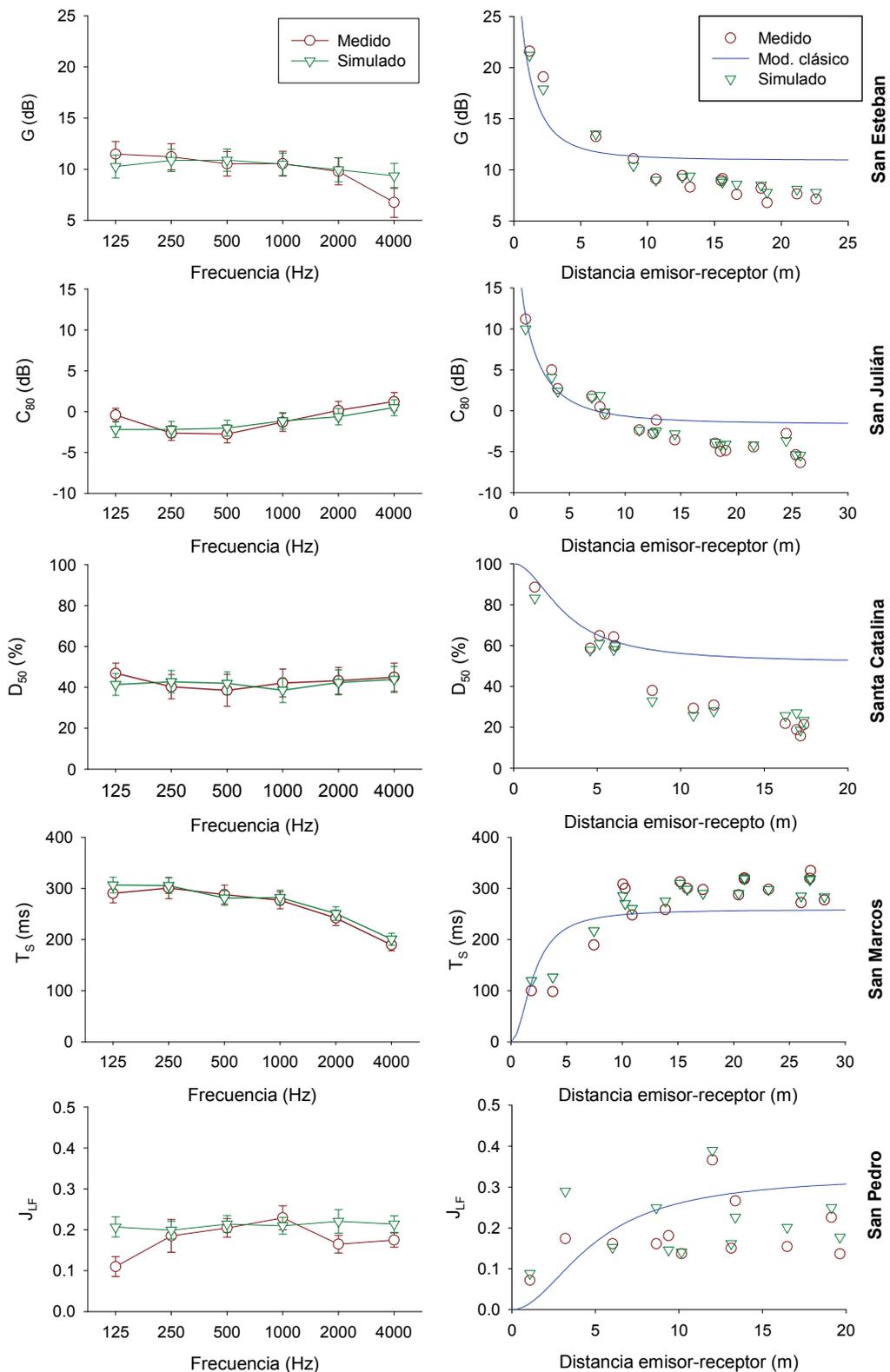
proceso iterativo de ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales que ofrecen mayor incertidumbre: las paredes verticales de las tres naves de cada iglesia.

Los valores de los parámetros objetivos relacionados con la inteligibilidad del discurso hablado se deducen a partir de los ecogramas obtenidos durante el proceso de simulación; derivando primero la función de transferencia de modulación para, posteriormente, obtener los valores del índice RASTI. Se observa una gran similitud entre los valores simulados y los medidos, a pesar de la diferente metodología seguida en su obtención: los simulados se deducen a partir de las funciones de transferencia de modulación obtenidas de los ecogramas, mientras que los valores experimentales se han obtenido mediante señales estacionarias de ruido modulado. En estos espacios de culto, el nivel de ruido de fondo no es muy significativo, dominando el efecto reverberante en la degradación de la inteligibilidad; por tanto, un buen ajuste de los coeficientes de absorción juega un papel crucial en la obtención de valores simulados similares a los medidos.

La Fig. 8 compara los resultados simulados con las medidas experimentales, para cada uno de los receptores, en la Iglesia de San Esteban para el índice RASTI. Los resultados corresponden a las mediciones realizadas con el equipo B&K, sin apoyo electroacústico y con un nivel de emisión ajustado a  $ref + 10$  dB, lo que supone 69 dB en la banda de 500 Hz y 60 dB en la banda de 2 kHz a 1 m del altavoz. A la derecha de la figura, aparecen los intervalos de calificación cualitativa de la inteligibilidad de la palabra. La coincidencia es más que aceptable en todas las áreas del recinto de culto y la calificación de la inteligibilidad, si exceptuamos el presbiterio, en casi toda la iglesia se queda en el rango de *pobre*.

Continuando con la comparación entre los resultados medidos y simulados, en la Fig. 9 se presentan los resultados de los siguientes parámetros acústicos monofónicos: fuerza sonora, claridad, definición, tiempo central y fracción de energía lateral precoz, para cinco de las seis iglesias seleccionadas. En todos los casos, se estudió el comportamiento frente a la frecuencia de los valores promediados espacialmente y la distribución espacial de los valores espectralmente promediados en función de la distancia fuente-receptor. En cuanto al comportamiento frente a la frecuencia, se muestra la dispersión espacial, para cada banda de octava, con la barra de error vertical cuya longitud viene dada por el error estándar (o error cuadrático medio). En la Fig. 9, todas las gráficas utilizan una nomenclatura común. Cabe destacar la coincidencia aceptable, tanto para la dependencia espectral como para la espacial, entre los resultados simulados y los de las mediciones *in situ*.

Como referencia, al representar la dependencia de estos parámetros frente a la distancia fuente-receptor, se ha superpuesto la curva prevista por la teoría clásica, lo que supone admitir un comportamiento perfectamente difuso del campo acústico en las iglesias, y utilizar en los cálculos los volúmenes y tiempos de reverberación medidos. Se observa que todos los



**Figura 9.** Dependencia con la frecuencia (izquierda) y con la distancia emisor-receptor (derecha) para la fuerza sonora, la claridad, la definición, el tiempo central y la fracción de energía lateral precoz. Se comparan los valores medidos y simulados para cinco iglesias.

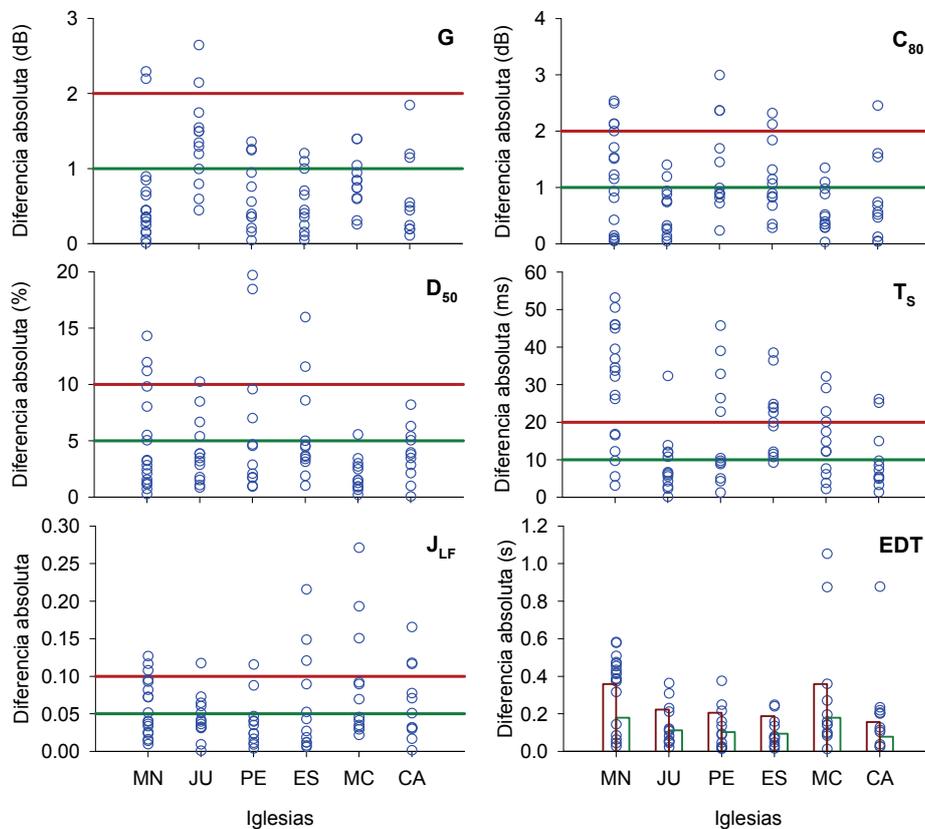
parámetros, medidos y simulados, se alejan de las predicciones clásicas y, por tanto, el campo sonoro en las iglesias difiere claramente del decaimiento puramente exponencial.

Es bien conocido el hecho de que en las iglesias las curvas de extinción muestran un comportamiento complejo sobre todo para la energía inicial. Para la tipología que nos ocupa, se

ha propuesto un modelo analítico capaz de describir adecuadamente la distribución de energía [32] que es capaz de predecir el comportamiento frente a la distancia emisor-receptor de los parámetros acústico basados en la energía acústica. En ese trabajo se discutió y aplicó el anteriormente propuesto por Cirillo *et al.* [33] para iglesias italianas, e investigaciones teóricas posteriores sobre curvas con caídas de varias pendientes, utilizando potentes métodos de estimación [34], han inspirado a Martellotta [35] hacia un refinamiento del modelo lineal anterior para iglesias [32], disminuyendo la complejidad en los cálculos. Una explicación más detallada de la propagación del sonido en estos espacios complejos requiere un análisis profundo y disponer de más datos experimentales sobre otras tipologías de lugares de culto, y constituye parte de investigaciones en curso en nuestro grupo.

En cuanto a los resultados de la simulación, de entre todos los parámetros basados en la energía acústica, la fracción de energía lateral es el más deficientemente simulado en lo que respecta al comportamiento espectral, ya que este parámetro es el más sensible a la posición relativa emisor-receptor. El valor medio, para cada banda de octava difiere alrededor de 0.05 (1 JND) y, ocasionalmente, para la de 125 Hz hasta 0.1 (2 JNDs). En todas las iglesias, los valores medios simulados son casi constantes para todas las frecuencias, mientras que los medidos aumentan entre 125 Hz y 1 kHz y disminuyen entre 1 y 4 kHz, como muestra la Fig. 9 para la Iglesia de San Pedro (PE). De acuerdo con los ecogramas direccionales suavizados que presenta el programa según las tres direcciones espaciales perpendiculares (arriba-abajo, delante-atrás e izquierda-derecha), y considerando esta última dirección, las mayores discrepancias aparecen en los primeros 80 ms [36]. En todos los casos el comportamiento de las bajas frecuencias, y especialmente en la banda de octava de 125 Hz, presenta valores promedio que difieren significativamente de los valores experimentales. Mejores resultados se obtienen desde 500 hasta 4000 Hz, especialmente en el caso de la iglesia de San Marcos (no mostrados).

El análisis de la dependencia con la distancia pone de manifiesto que los valores experimentales de  $J_{LF}$ , espectralmente promediados, son mayores en los puntos de recepción



**Figura 10.** Diferencias absolutas entre los valores medidos y simulados, espectralmente promediados, para todos los puntos de recepción, en cada iglesia, y para cada parámetro acústico (O). Se indican dos límites en términos de los correspondientes JND: en verde para 1 JND y en rojo para 2 JND.

**Tabla 4.** Umbral diferencial subjetivo (JND) para cada parámetro.

Parámetro	JND
G	1 dB
C80	1 dB
D50	5%
T <sub>s</sub>	10 ms
J <sub>LF</sub>	0.05
EDT	5%

**Tabla 5.** Porcentaje de las diferencias absolutas entre valores medidos y simulados, espectralmente promediados, para todos los receptores en cada iglesia y para cada parámetro en los intervalos de 1 y 2 JND.

Rango	G	C <sub>80</sub>	D <sub>50</sub>	T <sub>s</sub>	J <sub>LF</sub>	EDT
1 JND (%)	75.5	64.1	73.1	39.7	62.8	47.4
2 JNDs (%)	94.9	87.2	89.7	62.8	83.3	64.1

de las naves laterales que en los de la nave central [36]. Estos resultados no se confirman en las simulaciones, quizás debido a las limitaciones de la técnica de *ray-tracing* que origina sombras acústicas causadas por las columnas y pilares. Esto se puede poner de manifiesto mediante la opción del software de "mapeado del área de audiencia".

Para completar esta información, la Fig. 10 muestra la diferencia absoluta entre los valores espectralmente promediados (ver Sección 3) medidos y simulados, para todos los puntos de recepción en cada iglesia, y para cada parámetro acústico. Puesto que el software MLSSA calcula, para cada receptor, la distancia desde la fuente a partir del instante de la llegada del sonido directo, se han omitido los receptores que no estaban expuestos a este sonido directo. Bork [5] propuso una forma estándar para comparar los valores medidos y simulados mediante el umbral de percepción subjetiva de cada uno de los parámetros acústicos, mostrados en la Tabla 4, admitiéndose que la simulación es adecuada si las diferencias entre los dos conjuntos de valores están comprendidas en el rango de 1 a 2 veces los respectivos JNDs [2,5].

En la Fig. 10 se observa que la mayoría de los puntos de recepción, para todos los descriptores acústicos mencionados, incluyendo el parámetro EDT, se incluyen en el rango de precisión señalado, apoyando así la adecuación de las simulaciones. Para cuantificar estos resultados, se muestra en la Tabla 5 el porcentaje de estas diferencias en los intervalos respectivos de 1 y 2 JNDs. Hay algunas excepciones aisladas en algunas iglesias, como en la de Santa Marina (MN), que tiene cerca del 40% de sus puntos fuera de la gama de 2 JNDs para dos parámetros, T<sub>s</sub> y EDT, altamente correlacionados.

Debe prestarse especial atención a la fracción de energía lateral precoz. Debido a su definición y el error sistemático asociado con la medición (orientación y sensibilidad del micrófono multipatrón) [37], se esperaría tener las mayores discrepancias para J<sub>LF</sub>. Esto no es cierto para el J<sub>LF</sub> espectralmente promediado en estas iglesias; especialmente en el caso de la iglesia de San Pedro (PE), cuyas diferencias para todos los puntos de recepción, excepto uno, están en el rango de 1 JND. Puesto que las paredes verticales de las tres naves de la iglesia de San Pedro muestran una profusa decoración uniformemente distribuida (ver Tabla 1), estas particularidades no fueron modeladas y se incluyeron como características de la pared en sus coeficientes de absorción y dispersión. Esto podría ser un punto débil, pero los resultados demuestran lo contrario. Obviamente este argumento falla en bajas frecuencias cuando el análisis se realiza en bandas de octava, particularmente a 125 Hz.

A fin de cuantificar la precisión punto a punto de la simulación para cada iglesia, en la Tabla 6, la primera columna para cada parámetro, muestra el valor promediado espacialmente de las diferencias absolutas, calculadas en cada receptor, entre los valores medidos y los simulados, espectralmente promediados. La columna a su derecha muestra el error estándar típico de

**Tabla 6.** Valores espacialmente promediados de las diferencias absolutas entre los valores medidos y simulados, espectralmente promediados, en cada receptor (columna izquierda) y su error estándar asociado (columna derecha) para cada parámetro y en cada iglesia

Parámetro	MN	JU	PE	ES	MC	CA						
G (dB)	0.51	0.09	1.33	0.16	0.75	0.13	0.51	0.11	0.95	0.08	0.77	0.11
C <sub>80</sub> (dB)	1.23	0.20	0.55	0.13	1.78	0.45	1.12	0.19	0.89	0.16	0.71	0.20
D <sub>50</sub> (%)	4.17	0.82	4.22	1.01	9.08	3.08	4.79	1.30	1.94	0.44	3.85	0.80
T <sub>s</sub> (ms)	26.30	3.09	26.37	2.91	32.77	7.40	13.08	2.45	10.45	2.44	11.44	3.58
J <sub>LF</sub>	0.08	0.02	0.04	0.01	0.03	0.007	0.06	0.02	0.09	0.03	0.06	0.02
EDT (s)	0.42	0.03	0.09	0.02	0.11	0.03	0.08	0.02	0.15	0.02	0.12	0.03

estas diferencias para cada parámetro y cada iglesia. El promedio espectral para cada parámetro se ha realizado siguiendo las indicaciones presentadas en la Sección 3. Al calcular estos valores medios se han ignorado los receptores situados a una distancia inferior a la dada por la expresión:  $d_{\min} = 2\sqrt{V/(cT)}$  (ver [25]). Esta tabla muestra que existe una adecuada concordancia entre los valores medidos y los simulados para estos espacios de culto. Para todos los parámetros, el valor medio de las diferencias es aproximadamente 1 JND para todas las iglesias. Los valores de  $C_{80}$  en la iglesia de San Pedro (PE), los de  $J_{LF}$  en las de Santa Marina y San Marcos y los de EDT en la de Santa Marina son del orden de 2 JNDs. La situación más desfavorable se presenta para  $T_S$  en las iglesias de San Pedro, San Julián y Santa Marina, que rondan los 3 JNDs.

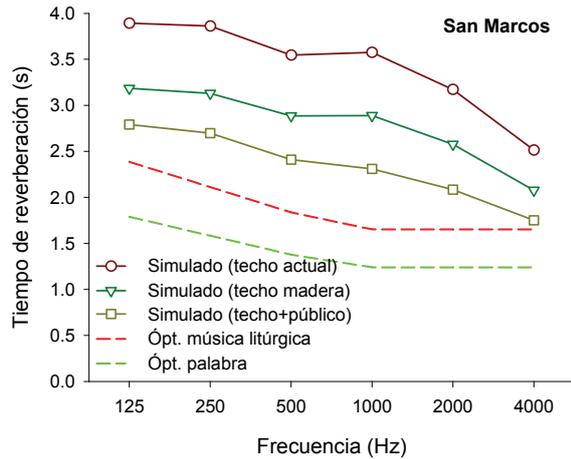


Figura 11. Tiempo de reverberación simulado, tras modificar el modelo, en bandas de octava, para la iglesia de San Marcos comparados con los valores óptimos para música litúrgica y para la palabra.

### 4.3. Modelos modificados de las iglesias de San Marcos y San Pedro

A fin de estudiar la recreación del entorno acústico en tiempos pretéritos y valorar la importancia de la cubierta de madera en estos recintos de culto, se ha realizado una nueva simulación para la iglesia de San Marcos que incorpora el artesanado Mudéjar (ahora inexistente) en su nave central. La superficie de esta cubierta es de 175 m<sup>2</sup>. Los coeficientes de absorción y de dispersión del techo actual se asocian con “suelo de bloques cerámicos (BC)” y los de la nueva cubierta simulada corresponden a CM (ver Tabla 1). El software utilizado permite así una reconstrucción de la situación original y evaluar la importancia de la cubierta de madera original. Es evidente que la sustitución de los rasillones cerámicos por un techo de madera aumentará la cantidad de absorción y, por tanto, disminuirá el tiempo de reverberación. No obstante, esta disminución por sí sola, no sería suficiente para proporcionar condiciones acústicas aceptables (ver Fig. 11) y quedaría, junto a la iglesia de Santa Marina (con tiempos de reverberación frente a la frecuencia muy similares), como uno de los casos más desfavorables. La disminución del tiempo de reverberación es más acusada a bajas y medias frecuencias, con caídas de entre 0.3 y 0.7 s.

Esta sustitución también tendrá influencia sobre los demás parámetros acústicos. Los

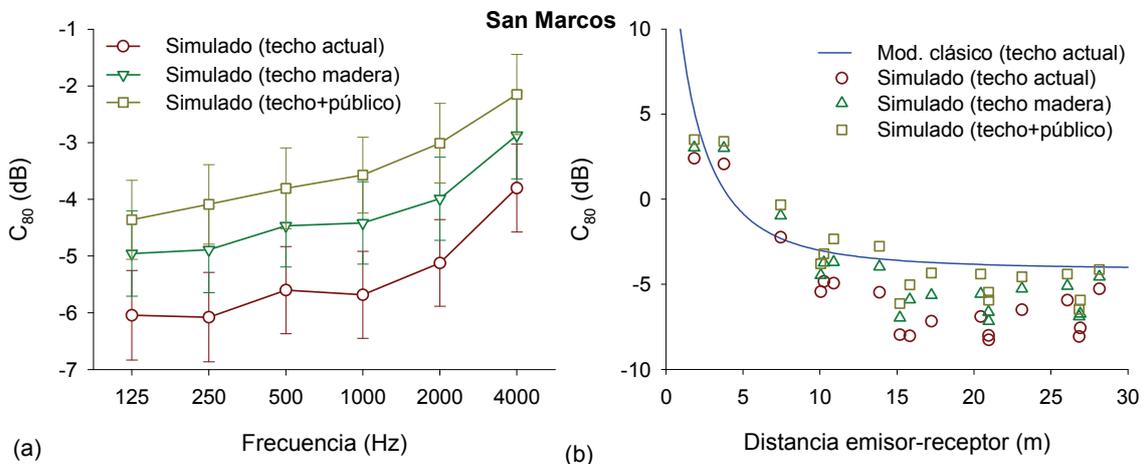


Figura 12. Comparación de los valores de la claridad para las tres simulaciones implementadas para la iglesia de San Marcos: (a) valores promediados espacialmente frente a la frecuencia y (b) valores espectralmente promediados frente a la distancia emisor receptor.

**Tabla 7.** Valores simulados, espacialmente promediados, y sus errores estándar, para cada banda de octava, en la iglesia de San Marcos para las condiciones actuales (arriba), con una posible cubierta de madera en la nave central (centro) y, si además se considera con una densidad de ocupación del 100% (abajo).

Frecuencia	G (dB)	$C_{80}$ (dB)	$D_{50}$ (%)	$T_S$ (ms)	$J_{LF}$	EDT (s)						
125 Hz	13.4	0.6	-6.0	0.8	14.7	3.3	306.5	15.4	0.23	0.02	4.14	0.08
	12.3	0.6	-5.0	0.8	16.9	3.3	239.8	12.1	0.23	0.02	3.38	0.11
	11.6	0.7	-4.4	0.7	18.4	3.3	211.8	10.5	0.22	0.02	2.69	0.07
250 Hz	13.4	0.6	-6.1	0.8	14.3	3.2	305.9	15.3	0.23	0.02	4.08	0.08
	12.3	0.7	-4.9	0.8	17.2	3.4	233.3	11.8	0.23	0.02	3.37	0.11
	11.5	0.7	-4.1	0.7	19.0	3.2	206.6	10.5	0.24	0.02	2.63	0.08
500 Hz	13.0	0.6	-5.6	0.8	15.1	3.3	281.1	14.4	0.25	0.02	3.73	0.09
	11.9	0.7	-4.5	0.7	18.6	3.3	219.9	11.1	0.24	0.02	3.23	0.10
	11.0	0.8	-3.8	0.7	19.9	3.4	189.4	9.91	0.23	0.02	2.38	0.07
1 kHz	13.0	0.6	-5.7	0.8	15.1	3.2	283.5	14.5	0.25	0.02	3.77	0.09
	11.9	0.7	-4.4	0.7	18.4	3.4	219.5	11.5	0.23	0.02	3.31	0.11
	10.7	0.8	-3.6	0.7	20.2	3.3	182.2	9.39	0.23	0.02	2.29	0.07
2 kHz	12.3	0.6	-5.1	0.8	16.6	3.3	250.8	13.2	0.25	0.02	3.31	0.10
	11.3	0.7	-4.0	0.7	19.9	3.4	198.7	10.7	0.23	0.02	2.96	0.10
	10.2	0.8	-3.0	0.7	22.3	3.5	165.8	9.14	0.23	0.02	2.07	0.06
4 kHz	11.1	0.7	-3.7	0.7	20.3	3.7	199.0	11.3	0.26	0.02	2.59	0.09
	10.2	0.8	-2.9	0.8	23.1	3.7	163.8	9.8	0.24	0.02	2.37	0.09
	9.2	0.9	-2.2	0.7	25.0	3.7	143.6	8.35	0.24	0.02	1.81	0.06

parámetros relacionados con la inteligibilidad de la voz y la calidad de la música proporcionan mejores condiciones para la nueva simulación en comparación con la situación existente. Para comparar la modificación de las condiciones acústicas, en la Fig. 12 (a) se ha representado el comportamiento espectral de la claridad. Se observa un incremento de alrededor de 1 dB (aproximadamente 1 JND) en todas las bandas de octava desde la situación actual hasta la modelada con la cubierta mudéjar. La dispersión espacial, en términos del error estándar, se mantiene aproximadamente constante. La Tabla 7 muestra los valores medios simulados y sus errores estándar para el resto de parámetros y para cada una de las bandas de octava. En ella podemos observar que los valores de  $G$ , espacialmente promediados, disminuyen alrededor de 1 dB (1 JND), para cada banda de octava, desde la situación simulada con el techo cerámico actual hasta la situación con el de madera. Los valores de los errores estándar son casi constantes en las dos situaciones. En el caso de  $D_{50}$ , los valores promediados espacialmente se incrementan alrededor de un 3%, con dispersión espacial muy similar. Especialmente importante son las reducciones en los valores promedio del tiempo central, que suponen variaciones entre 5 y 7 JNDs. En este caso el parámetro de dispersión espacial muestra una leve reducción para todas las bandas de octava (alrededor de 5 ms). No se observan variaciones significativas para los valores de  $J_{LF}$ , como era de esperar, ya que la modificación realizada no tiene influencia directa sobre las reflexiones laterales. Por último, para el parámetro EDT, se observan variaciones que oscilan entre los 0.22 s (a 4000 Hz) y los 0.76 s (a 125 Hz), lo que supone variaciones comprendidas entre 2 y 3 JNDs.

En la Fig. 12(b) se muestra la dependencia del parámetro acústico  $C_{80}$ , espectralmente promediado, frente a la distancia fuente-receptor. Los valores simulados siguen tendencias similares, con un lógico incremento de los mismos para la simulación remodelada. Los demás parámetros acústicos exhiben un comportamiento similar.

También se investigó el efecto de la presencia del público en este lugar de culto. La configuración simulada que se presenta aquí corresponde a la hipótesis de un grado de ocupación del 100% de la zona de audiencia, con los asistentes sentados en los bancos de madera existentes. Los coeficientes de absorción y dispersión adoptados para las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz son (0.57, 0.61, 0.75, 0.86, 0.91, 0.86) [8] y (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8), respectivamente. Esta configuración es muy frecuente para los usos culturales de la iglesia. En los usos de culto la asistencia de fieles es variable según el día de la semana y la hora del día del acto litúrgico. Es posible realizar las mismas observaciones que en el caso anterior (ver Figs. 12(a) y 12(b) y la Tabla 7), para todos los parámetros acústicos, con una ligera variación a todas las frecuencias que supone una mejora de las condiciones acústicas. La fracción de energía lateral es el único parámetro que no experimenta un cambio

significativo que pueda causar variación en la percepción subjetiva. La nueva curva tonal correspondiente a la presencia de la audiencia aparece en la Fig. 11.

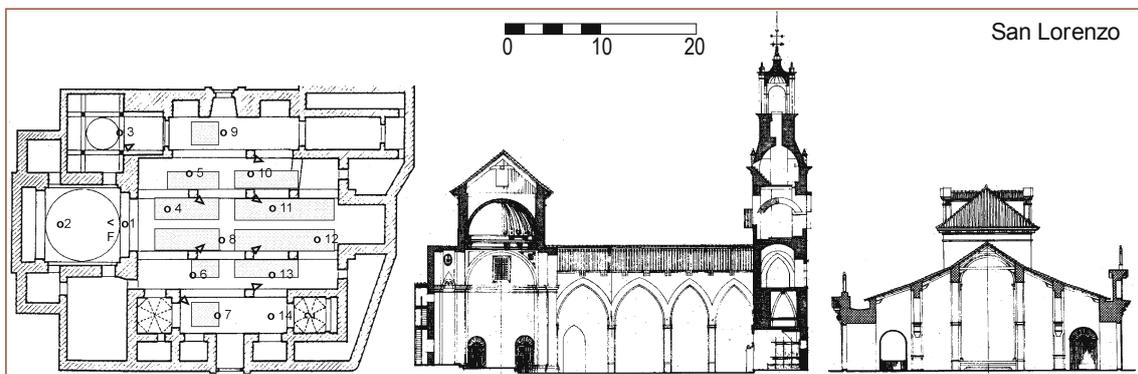
Aunque no se muestra, el aumento en el índice RASTI en las dos simulaciones de remodelación aún mantiene la calificación de *pobre* de la inteligibilidad de la palabra en la Iglesia de San Marcos.

Para profundizar en el análisis de la importancia de la cubierta de madera, se realizó otra simulación en la Iglesia de San Pedro. El material cerámico (MA), que actualmente cubre las naves laterales (169 m<sup>2</sup>), fue reemplazado por el techo de madera original. Los resultados simulados no presentaron variaciones ni en el comportamiento espectral, ni en su dependencia con la distancia emisor-receptor, ni para el tiempo de reverberación ni para el resto de los parámetros acústicos. Sólo en algunos de los receptores situados en las naves laterales se observan variaciones puntuales.

A partir de la información detallada de la Fig. 6, los histogramas de las iglesias de San Marcos y San Pedro muestran que el porcentaje de impactos en la cubierta (sumando todas las contribuciones de los diferentes planos que constituyen el techo) es mayor o igual en las naves laterales que en la nave central (7.9% en las naves laterales y 6.4% en la nave central para la iglesia de San Marcos; y 5.4%, tanto en las laterales como en la central, en la de San Pedro). Las demás iglesias simuladas presentan un histograma similar al de la iglesia de San Marcos. Se observa que sólo unas pocas superficies tienen un número de impactos significativo (paredes, suelo y cubierta de madera) y, por tanto, cualquier cambio del correspondiente material producirá una modificación notable de las características acústicas, como ocurrió en el caso de la Iglesia de San Marcos. Por otro lado, el número de impactos está más ampliamente distribuido en el caso de la Iglesia de San Pedro, y la sustitución de los materiales cerámicos por el techo de madera en sus naves laterales, no produce cambios significativos en los resultados simulados.

## 5. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN EN LA IGLESIA DE SAN LORENZO

En esta sección se presenta un caso en el que se utilizaron las técnicas de simulación con el



**Figura 13.** Planta, con la ubicación de los receptores (O), de la fuente (F) y de los altavoces del sistema electroacústico existente (▷), y secciones longitudinal y transversal de la Iglesia de San Lorenzo.

fin de evaluar, desde el punto de vista acústico, una posible intervención en una de las iglesias Gótico-Mudéjares analizadas. Mediante CATT-ACOUSTIC se ha implementado un modelo que se ha calibrado, usando el procedimiento iterativo ya descrito. Los resultados de los parámetros acústicos, tanto para la inteligibilidad de la palabra como para la audición musical, se han contrastado, tanto en su comportamiento espectral como en su distribución espacial, con los resultados experimentales obtenidos *in situ*. A partir de este modelo se han recreado las propuestas de una posible intervención de rehabilitación consistente en cambiar el acabado de ciertas paredes de la iglesia, con objeto de mejorar su comportamiento acústico, sin menoscabo de sus aspectos visuales y formales, dado su carácter patrimonial; así mismo, también ahora se han simulado las modificaciones producidas en el campo sonoro debido a la presencia del público en la zona de audiencia.



**Figura 14.** Vista interior de San Lorenzo: hacia el presbiterio (izquierda) y hacia los pies de la nave central donde se ubica el órgano (derecha).

Cuando se aborda un proceso de intervención en un objeto patrimonial se hace necesario acercarse al mismo con la intención de poner en valor su significación. Por ello, aunque sea brevemente, se referencian a continuación algunos datos significativos. La iglesia de San Lorenzo [38] está ubicada en Sevilla, en la plaza del mismo nombre, desde la cual tiene su acceso principal. El templo fue originalmente del tipo mudéjar sevillano, pero las reformas de los siglos XVIII y XIX alteraron sustancialmente el conjunto. A la obra primitiva corresponde la portada de cantería, oculta por la tribuna del órgano, y las ménsulas que reciben el vuelo de los arcos del último tramo de la nave central. La capilla mayor y las ubicadas a sus lados se proyectaron a principios del siglo XVII por Diego López Bueno, encargándose de su construcción, a partir de 1615, Andrés de Oviedo. El muro de los pies está concebido como una torre-fachada y aloja en el cuerpo inferior una portada de estructura ojival. Fue construida ya avanzado el siglo XV y rematada con un campanario barroco en 1757.

La planta del templo tiene forma muy irregular (Fig. 13) lo que prueba que no fue erigido en un programa constructivo único, sino que es el resultado de un largo proceso en el que a un núcleo básico se fueron añadiendo cuerpos y volúmenes hasta configurar su aspecto actual. Está formada por cinco naves, la central y las dos laterales adyacentes de cuatro tramos, y las dos laterales más alejadas de dos tramos. En total son ocho los pilares rectangulares que separan las naves. Los de la nave central apean arcos apuntados de desigual anchura. En las naves laterales los arcos son de medio punto, con luces también diferentes. A los pies de la nave central se aloja el coro con sillería de maderas nobles y, encima, el órgano. El presbiterio, en la cabecera de la nave central, se cubre con una bóveda semiesférica (Figs. 13, 14 y 15).

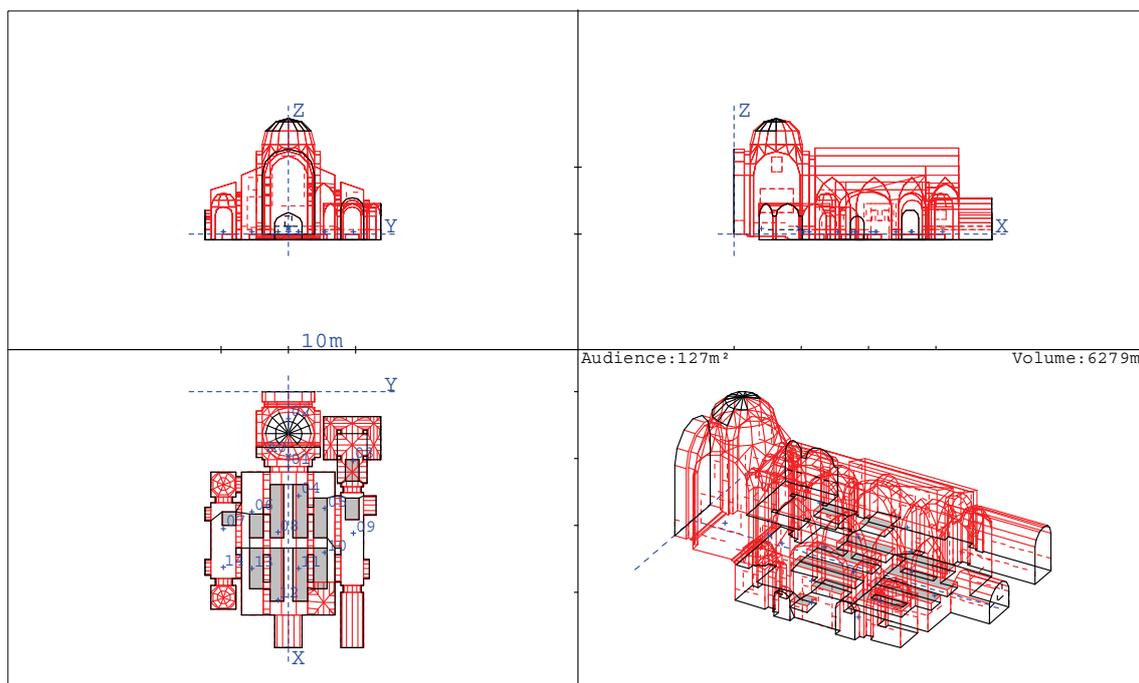
Las cubiertas de las naves son de madera, con armadura de tres paños con tirantes en la nave central y de colgadizo en todas las laterales. Se ilumina fundamentalmente por vidrieras dispuestas en las dos puertas de acceso. Las paredes son de fábrica de ladrillo enfoscada y/o enlucida y, posteriormente, pintada. Están muy ornamentadas con pinturas, altares, tallas, hornacinas con retablos, coro, órgano, y presentan un zócalo de azulejos de 1.5 m de alto, incluso en la base de los pilares. La capilla mayor se encuentra recorrida por un zócalo de azulejo sevillano de 2 m de altura y dos grandes cuadros a ambos lados del altar mayor. Además existen varias capillas laterales con una decoración profusa. El suelo es de mármol en toda la iglesia y el mobiliario está constituido por bancos de madera ubicados en la nave central y algunos asientos en las laterales adyacentes a ella (Figs. 13, 14 y 15).

### 5.1. Modelos acústicos

Para realizar la simulación acústica se ha utilizado, como en las secciones precedentes, CATT-ACOUSTIC. En la Fig. 15 se muestra la planta, las secciones, y la perspectiva del modelo creado de la iglesia, tras suprimir salas anexas y sacristía.

Una vez implementada la geometría básica del recinto se han realizado las modificaciones pertinentes para llevar a cabo tres simulaciones diferentes: en primer lugar se simuló las

condiciones en las que se realizaron las mediciones *in situ* con la iglesia vacía (la técnica y condiciones de medida ya se han detallado anteriormente) y utilizando los valores de los coeficientes de los materiales ya recogidos en la Tabla 1, para aquellos comunes a todas las iglesias, y los específicos de este templo que aparecen en la Tabla 8. Así se ha podido calibrar el modelo a partir de los valores del tiempo de reverberación medidos siguiendo el proceso



**Figura 15.** Planta, sección longitudinal, transversal y perspectiva 3D del modelo básico para la simulación de la iglesia de San Lorenzo.

iterativo ya descrito. Esto permitió ajustar los valores de los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales que son más desconocidos en la literatura, en este caso, como ya se hizo anteriormente, las paredes verticales perimetrales de las naves de la iglesia (pared adornada LO en la Tabla 8). En la segunda simulación se incorpora la presencia del público en la zona de bancos de la iglesia, simulando las condiciones normales para los actos litúrgicos (50% de ocupación) y en las condiciones actuales del templo. Los coeficientes de absorción aparecen en la Tabla 8 y están adaptados de [39]. Finalmente, se implementa y analiza la incidencia de una posible rehabilitación acústica que consiste en un tratamiento absorbente de parte de los cerramientos, con la condición de que éste sea formalmente respetuoso con el espacio eclesial y su valor patrimonial y sea posible siempre restituir el espacio a sus condiciones originales.

El programa nos permite valorar la importancia de cada uno de los planos en las simulaciones, observando el porcentaje de impactos sobre cada uno de ellos. Los resultados muestran que las contribuciones más significativas en esta iglesia corresponden al suelo, techo, paredes laterales y pared del fondo.

Para simular la segunda propuesta se cambió el coeficiente de absorción de los bancos de madera a los valores que se exhiben al final de Tabla 8 en la fila “bancos ocupados (50%)”.

Puesto que, incluso con la iglesia ocupada, los valores de los parámetros acústicos están lejos de los valores recomendables, parece necesario abordar algún tipo de rehabilitación para mejorar las condiciones acústicas de este recinto de culto. Se propone un tratamiento superficial con placa de yeso perforada, trasdosada con una manta de lana mineral, y terminada con enlucido microporoso sobre velo acústico de lana de vidrio, soportada por una estructura de perfiles anclados a la pared. En la Fig. 16 se muestran fotos de una muestra del material, siendo su apariencia final muy similar a las terminaciones enlucidas. Las superficies a tratar en la iglesia mediante este material se muestran en color verde en la Figura 17 y sus

coeficientes de absorción y dispersión para la recreación virtual aparecen reflejados al final de la Tabla 8, en la fila “trasdosado acústico”.

## 5.2. Resultados y discusión

En el conjunto de Figs. 18(a)-(f) se muestra el comportamiento espectral, por bandas de octava, de los siguientes parámetros acústicos: tiempo de reverberación, fuerza sonora, definición, claridad, tiempo central y fracción de energía lateral precoz, respectivamente, medidos [21] y simulados en los diferentes supuestos. Así mismo se han dibujado barras de error que dan cuenta de la dispersión espacial sobre los diferentes receptores mediante el error estándar. Para valorar la dispersión espacial, no se ha considerado el receptor 1 (demasiado cerca de la fuente) ni el 3 (no llega sonido directo). En la Figura 18(a) se detallan, además de los resultados medidos y simulados, los valores óptimos del tiempo de reverberación para la

Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Pared adornada LO	0.18	0.16	0.18	0.18	0.18	0.20
	0.20	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65
Coro de madera	0.17	0.18	0.19	0.18	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Órgano	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16
	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50	0.60
Terciopelo	0.10	0.14	0.15	0.18	0.30	0.38
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Lienzo	0.15	0.15	0.18	0.21	0.27	0.35
	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Bancos ocupados (50%)	0.27	0.37	0.42	0.45	0.48	0.58
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Trasdosado acústico	0.62	0.6	0.72	0.74	0.58	0.53
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

palabra y la música eclesial aportados por Knudsen *et al* [23]. Cabe señalar la concordancia entre los valores experimentales medidos *in situ* en la iglesia vacía y la simulación equivalente tras el proceso iterativo de calibración del modelo informático. Se observa un ligero descenso de la curva tonal a todas las frecuencias en la simulación con la presencia de público, y el notable descenso con la incorporación del trasdosado en las paredes verticales señaladas en la Fig. 17. Con esta intervención el tiempo de reverberación se aproxima a la banda óptima, más aún si incorporamos la presencia de público cuando se realice el tratamiento.



Figura 16. Panel de yeso laminado perforado propuesto para la rehabilitación (Knauf STO).

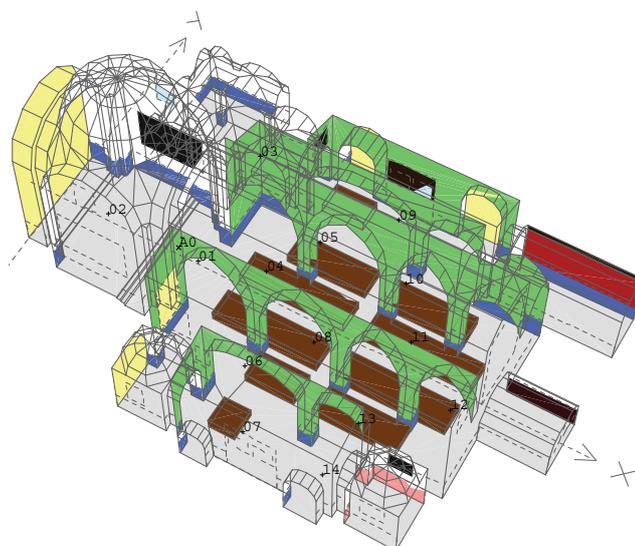


Figura 17. Modelo de mejora con trasdosado acústico (superficies indicadas en color verde).

Para la fuerza acústica aparecen ligeras discrepancias entre los resultados experimentales y los simulados, para las distintas frecuencias, en las mismas condiciones (iglesia vacía), con diferencias en promedio de unos 2 dB (2 JND). La incorporación de público no supone un cambio sustancial con respecto a la simulación real y solo el tratamiento absorbente de las paredes verticales tiene una influencia significativa en la disminución de la energía inicial y final reflejada en la iglesia. Como norma general común en los parámetros energéticos (definición, claridad y tiempo central) cabe señalar que existe una buena aproximación entre los valores medidos *in situ* y simulados sin público, también que existe muy poca diferencia en los resultados de la simulación con público y sin público en la iglesia y que el tratamiento de las paredes propuesto supone un incremento de un 20% en la definición (4 JND), de unos 4 dB (4 JND) en la claridad, y una disminución del tiempo central de unos 80 ms (8 JND), por término medio, en todas las frecuencias. En cuanto a la fracción de energía lateral precoz cabe destacar que presenta un comportamiento similar en todos los casos simulados, mostrando éstos solo una variación notable con los valores medidos a 125 Hz.

Finalmente en la Fig. 19 se representan los valores del índice RASTI en todos los puntos de recepción en la iglesia; la concordancia entre los resultados medidos y simulados son excelentes lo que corrobora la bondad del procedimiento implementado. Es de destacar cómo la incorporación del trasdosado en las paredes verticales supone un salto en la calificación de la iglesia de *pobre* al límite superior de la zona *aceptable* en todos sus puntos.

## 6. CONCLUSIONES

El conocimiento de los datos experimentales de reverberación en las iglesias estudiadas permite ajustar los valores de los coeficientes de absorción y dispersión que caracterizan acústicamente sus superficies interiores menos conocidas. Este procedimiento, que podría suponer una limitación, es al mismo tiempo una ventaja, ya que permite evaluar de forma eficiente los efectos sobre el comportamiento acústico de los espacios en los proyectos de reforma futura, restauración, mantenimiento o acondicionamiento para usos temporales específicos.

De hecho, este punto de partida inicial asegura una simulación adecuada de las RI y, en consecuencia, gran precisión en los valores de los parámetros acústicos más importantes deducidos a partir de ellas. Cabe destacar que esta precisión aparece tanto en los valores promediados espacialmente para las diferentes bandas de octava y su dispersión espacial, como en la distribución espacial de los valores de los parámetros, espectralmente promediados, utilizados para calificar la acústica del recinto, principalmente en referencia a su dependencia respecto de la distancia emisor-receptor. Por lo tanto, para los parámetros que son muy sensibles a la posición, como el tiempo de reverberación inicial, la claridad y la definición, e incluso la fracción de energía lateral precoz, los resultados obtenidos en la simulación están en excelente concordancia con los valores medidos experimentalmente. Esta coincidencia ha sido analizada en términos del JND para cada parámetro. Los resultados para el índice RASTI también han mostrado un acuerdo muy notable en todas las zonas de la iglesia a pesar de las dificultades relacionadas con los distintos métodos empleados para obtener las funciones de transferencia de modulación.

El proceso iterativo utilizado y la estimación de las irregularidades facilitan la descripción adecuada de las características acústicas de los materiales mediante sus coeficientes de absorción y dispersión. Este procedimiento permite caracterizar una superficie heterogénea, constituida por fragmentos de diferentes materiales y configuraciones.

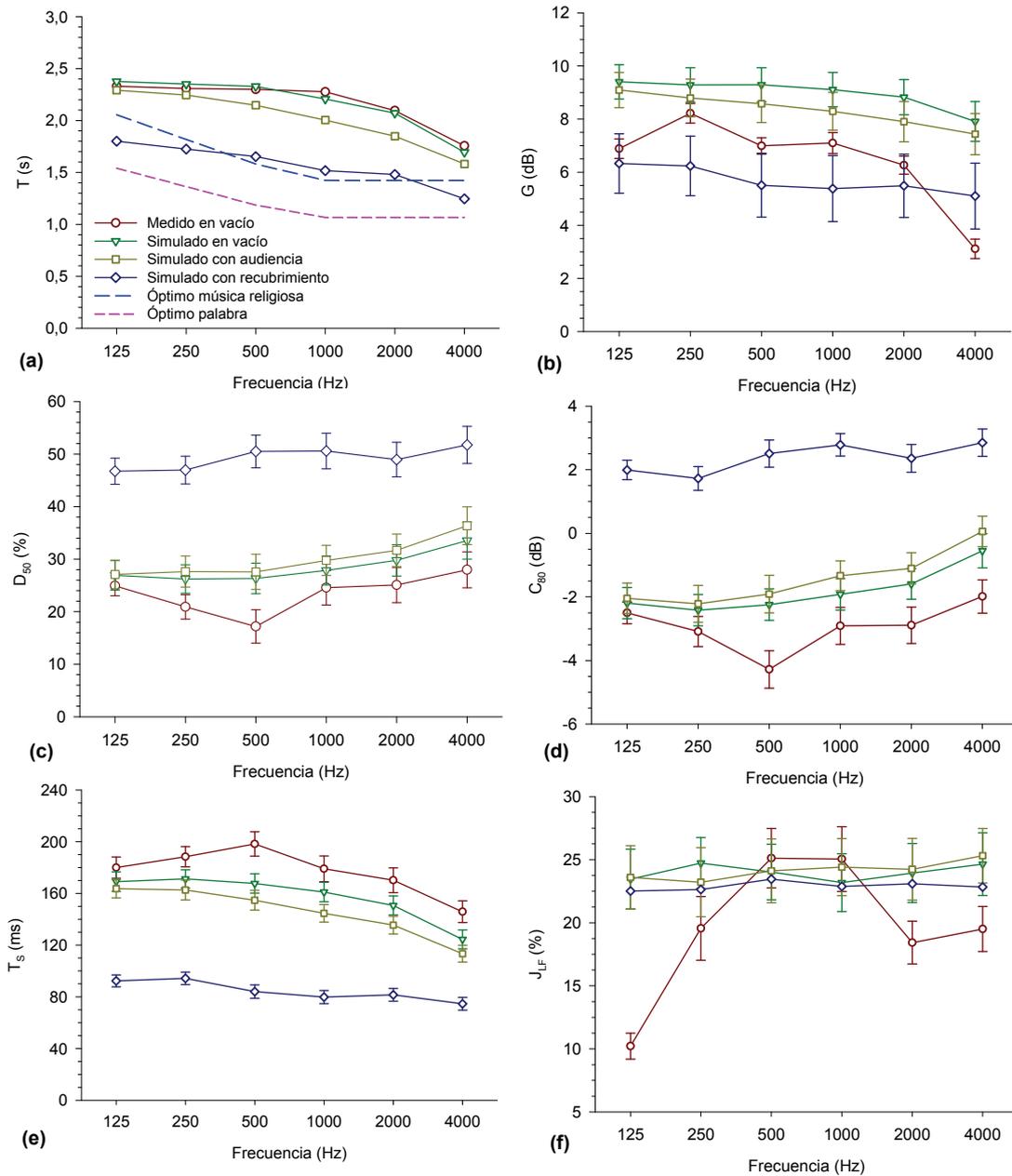


Figura 18. Valores de los parámetros acústicos medidos y simulados, promediados espacialmente, frente a la frecuencia, con valoración de la dispersión espacial mediante el error estándar: (a) tiempos de reverberación; (b) fuerza sonora; (c) definición; (d) claridad; (e) tiempo central y (f) fracción de energía lateral precoz.

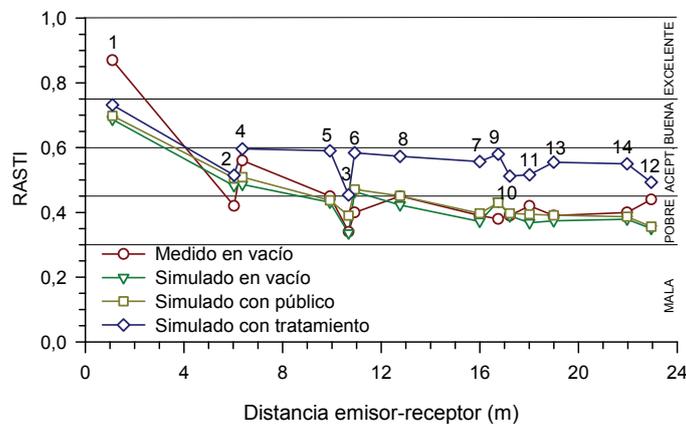


Figura 19. Índice RASTI frente a la distancia emisor-receptor, medido y simulado en los diferentes supuestos para la iglesia de San Lorenzo.

Mediante las simulaciones por ordenador es posible recrear el comportamiento acústico de las iglesias Gótico-Mudéjares en configuraciones y para celebraciones litúrgicas de tiempos pasados, actuales o futuros. Estas recreaciones se han realizado con éxito en dos de estas iglesias.

Finalmente se ha creado y calibrado un modelo de la iglesia de San Lorenzo con el objetivo fundamental de evaluar una posible rehabilitación para mejorar las condiciones acústicas. La comparación de los resultados simulados con los medidos da garantías de la validez del procedimiento implementado para poder aceptar los resultados de la recreaciones estudiadas: incorporar público en la zona de bancos y la intervención con tratamiento absorbente de ciertas paredes de la iglesia, que siendo respetuoso con las formas y el acabado original de la misma, mejora sustancialmente sus condiciones acústicas, como evidencian los resultados virtuales de los parámetros descriptores de calidad acústica obtenidos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2010-20523.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. H. Rindel, "The use of computer modelling in room acoustics," *Journal of Vibroengineering* 3, 219–224 (2000).
- [2] M. Vorländer, *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality* (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
- [3] B.-I. Dalenbäck, *CATT-A v9.0 User's Manual (CATT-Acoustic with TUCT)*, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [4] I. Bork, "A comparison of room simulation software—The 2nd round robin on room acoustical computer simulation," *Acust.- Acta Acust.* 86, 943–956 (2000).
- [5] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation—Part II: Calculations," *Acta. Acust.- Acust.* 91, 753–763 (2005).
- [6] Y. W. Lam, "A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models," *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 2181–2192 (1996).
- [7] M. Vorländer y E. Mommertz, "Definition and measurement of random incidence scattering coefficients," *Appl. Acoust.* 60, 187–199 (2000).
- [8] T. J. Cox y P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application* (Spon, London, 2004).
- [9] T. J. Cox, B.-I. L. Dalenbäck, P. D'Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, y M. Vorländer, "A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces," *Acta. Acust. Acust.* 92, 1–15 (2006).
- [10] Y. H. Kim, H. S. Jang, y J. Y. Jeon, "Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients," *Appl. Acoust.* 72, 899–905 (2011).
- [11] ISO 17497-1, "Acoustics—Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room," *International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland* (2004).
- [12] A. Krockstadt, S. Ström, y S. Sörnsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," *J. Sound Vib.* 8, 118–125 (1968).
- [13] A. Kulowski, "Algorithmic representation of the ray tracing technique," *Appl. Acoust.* 18, 449–469 (1985).
- [14] I. A. Drumm y Y. W. Lam, "The adaptive beam-tracing algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 1405–1412 (2000).
- [15] T. Lewers, "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics," *Appl. Acoust.* 38, 161–178 (1993).
- [16] M. Vorländer, "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 172–178 (1989).

- [17] R. San Martín y M. Arana, "Predicted and experimental results of acoustic parameters in the new Symphony Hall in Pamplona, Spain," *Appl. Acoust.* 67, 1–14 (2006).
- [18] G. Cammarata, A. Fichera, A. Pagano, y G. Rizzo, "Acoustical prediction in some Italian theatres," *ARLO* 2, 61–66 (2001).
- [19] A. ElKhateeb y M. Refat, "Sounds from the past: the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrasa," *Build. Acoust.* 14, 109–132 (2007).
- [20] S. L. Vassilantonopoulos y J. N. Mourjopoulos, "A study of ancient Greek and Roman theater acoustics," *Acta. Acust. Acust.* 89, 123–136 (2003).
- [21] M. Galindo, T. Zamarreño, y S. Girón, "Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 2873–2888 (2005).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, y S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 1207–1218 (2009).
- [23] V. O. Knudsen y C. M. Harris, *Acoustical Design in Architecture*, 5th ed. (Acoustical Society of America, New York, 1988).
- [24] Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
<http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/datenbank.htm> (visitada en octubre, 2011).
- [25] ISO 3382, "Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters," International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland (1997).
- [26] IEC 60268-16, "Sound system equipment, Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland (2003).
- [27] N. Xiang y M. R. Schroeder, "Reciprocal maximum-length sequence pairs for acoustical dual source measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 2754–2761 (2003).
- [28] L. G. Marshall, "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio," *J. Acoust. Soc. Am.* 96, 2251–2261 (1994).
- [29] W. Ahnert y H. P. Tennhardt, "Acoustics for Auditoriums and Concert Halls," in *Handbook for Sound Engineers*, edited by G. M. Ballou, (Elsevier, New York, 2005), pp. 109–155.
- [30] ISO/DIS 3382-1, "Acoustics—Measurement of room acoustic parameters. Part I: Performance rooms," International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland (2006) (actualizada en 2009 y traducida como UNE-EN-ISO 3382-1 en 2010).
- [31] J. E. Summers, R. R. Torres, Y. Shimizu, y B.-I. L. Dalenbäck, "Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing," *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 1491–1502 (2005).
- [32] T. Zamarreño, S. Girón, y M. Galindo, "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 234–250 (2007).
- [33] E. Cirillo y F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 232–248 (2005).
- [34] N. Xiang y T. Jasa, "Evaluation of decay times in coupled spaces: An efficient search algorithm within the Bayesian framework," *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 3744–3749 (2006).
- [35] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L)," *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 1281–1284 (2009).
- [36] S. Girón, M. Galindo, y T. Zamarreño, "Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches," *J. Sound Vib.* 315, 1125–1142 (2008).
- [37] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation—Part I: Measurements," *Acta. Acust. - Acust.* 91, 740–752 (2005).
- [38] A. J. Morales, *La iglesia de San Lorenzo de Sevilla*. Sever-Cuesta, Sevilla, (1981).
- [39] F. Martellotta, y E. Cirillo "Experimental studies of sound absorption by church pews," *Appl. Acoust.* 70, 441–449 (2009).