



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

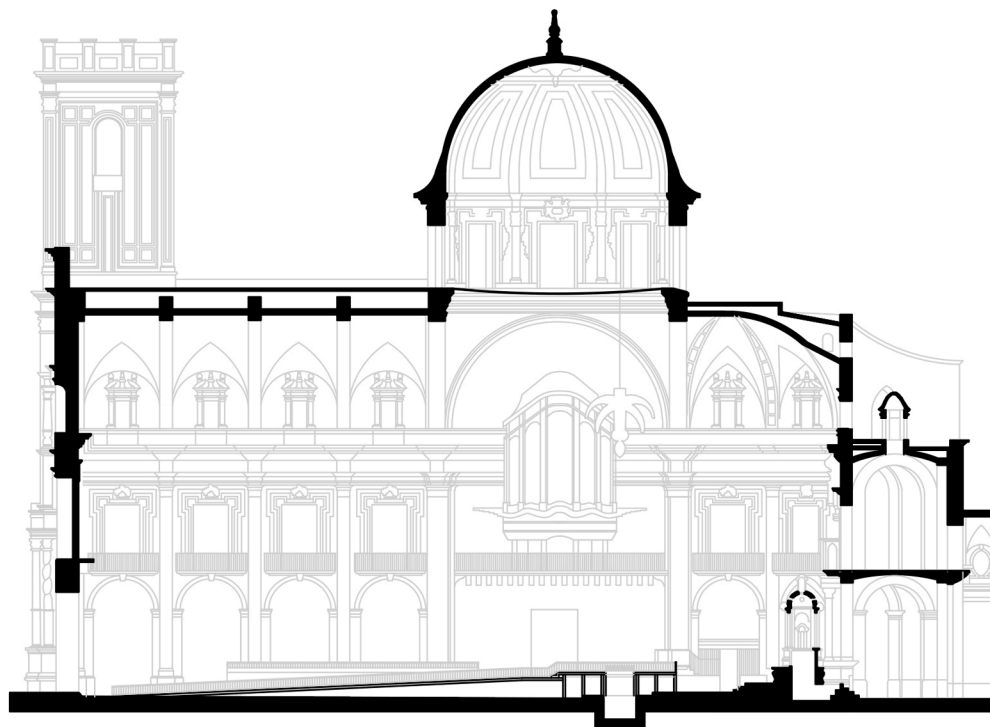
TESIS DOCTORAL

La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx.

Autora: Ana Planells Pérez

Directora: Alicia Giménez Pérez

Julio 2017





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx.

Autora: Ana Planells Pérez

Directora: Alicia Giménez Pérez

Julio 2017

Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje.

Tutor: Manuel Jesús Ramírez Blanco

Agradecimientos

Quiero mostrar mi gratitud hacia todas las personas e instituciones que directa o indirectamente han participado en la realización de esta tesis doctoral.

Al Ministerio de Economía y Competitividad por los proyectos de investigación BIA2008-05485, BIA2012-36896 y BIA2016-76957-C3-3-R en los que se enmarca este trabajo.

Al Patronato Nacional del Misteri d'Elx, a los cantores y los responsables de la Basílica de Santa María por su colaboración.

A mi directora de tesis Alicia Giménez por darme la oportunidad de adentrarme en la investigación y en el estudio del patrimonio arquitectónico desde la acústica, por su confianza, orientaciones y dedicación.

A todos los miembros del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG por contribuir cada uno desde su campo; este es el resultado de un trabajo en equipo. A Radha Montell, Salvador Cerdá, Pablo Catalá y Arturo Barba, gracias por tantos buenos ratos dentro y fuera del laboratorio. Y muy especialmente a Rosa Cibrián y Jaume Segura por su ayuda, tiempo y paciencia.

A Manuel Ramírez por su amabilidad y recomendaciones.

A Lidia Álvarez por sus explicaciones sobre simulación acústica y sus atenciones durante mi estancia en la Universidad de Sevilla.

A mi familia por estar siempre dispuesta a ayudar, en concreto a Javi por sus sabios consejos y a Andrés por ser el mayor experto en escritura de fórmulas.

A mis amigos por su apoyo constante, y por entender mis ausencias y mi falta de tiempo en los últimos meses.

A David, Fran, Rony, Charo, Lulo, Cris, Emilio, Paz, Fernan y Elo porque estos años en la UPV no habrían sido lo mismo sin ellos.

Y a Nacho por enseñarme tanto de arquitectura y patrimonio.

Resumen

Los recintos de culto son espacios de reunión en los que la acústica debe ser adecuada para la inteligibilidad de la palabra, pero también apropiada para la música. Por este motivo es importante conocer el comportamiento acústico de estos espacios en ambos casos y las diferencias que se producen en función de la actividad que se está realizando.

En este sentido, los modelos virtuales han demostrado ser un instrumento muy eficaz para el estudio del comportamiento de los edificios frente a diferentes aspectos, y que permiten recrear las experiencias sensoriales que transmiten esos espacios.

La Basílica de Santa María es el escenario en el que cada año tiene lugar la representación del Misteri d'Elx, obra teatral medieval cantada declarada Monumento Nacional en 1931, incluida en la primera Proclamación de las Obras Maestras del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO en 2001, e inscrita en 2008 en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad.

Dada su importancia, tanto la Basílica de Santa María como el Misteri han sido objeto de numerosos estudios. No obstante, todos ellos se han centrado principalmente en la historia y evolución de la representación o el aspecto formal del edificio dejando de lado la acústica de un espacio en el que el sonido resulta fundamental.

En este trabajo, mediante la acústica virtual, se realiza un estudio exhaustivo del comportamiento acústico de la Basílica para sus dos usos principales: la celebración del culto y la representación del Misteri d'Elx, analizando la influencia tanto de los cambios que se introducen en el espacio, como de la presencia del público, e identificando las singularidades de la aplicación de esta herramienta en edificios históricos, y más concretamente en recintos de culto.

Además, a partir de grabaciones realizadas con los cantores y escolanía del Misteri, y de la construcción y texturización de un modelo virtual de la Basílica, se inicia el trabajo para obtener una virtualización completa, visual y sonora, de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx, algo inédito hasta el momento y que permitirá interactuar desde cualquier lugar tanto con el patrimonio arquitectónico como con el patrimonio inmaterial vinculado a él.

Abstract

Worship spaces are meeting places where acoustics must be suitable to perceive the word as well as the music. Therefore, for this reason, it is important to know the acoustic behavior of both cases and the differences that happen according to the activity being performed.

In this respect, virtual models have proven to be a very efficient instrument to study the behavior of buildings in different aspects, allowing to recreate the sensory experiences that transmit these spaces.

The Basilica of Santa Maria is the stage where the representation of the Misteri d'Elx takes place every year. It is a musical medieval play declared as National Monument in 1931, included in the first Proclamation of the Masterpieces of the Oral and Intangible Heritage of Humanity by UNESCO in 2001, and inscribed in the Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity in 2008.

Due to its importance, both the Basilica of Santa Maria and the Misteri have been the object of numerous studies. However, all of them have focused mainly on the history and evolution of the representation or the formal aspect of the building, leaving aside the acoustics of a space where sound is fundamental.

This work includes an exhaustive study of the acoustic behavior of the Basilica for its two main uses: the celebration of the cult and the representation of the Misteri d'Elx using virtual acoustics, analyzing the influence of the spatial changes introduced and the presence of the public, and identifying the singularities of the application of this tool in historic buildings, and more specifically in worship spaces.

In addition, from recordings made with the singers and escolania of the Misteri, and the construction and texturization of a virtual model of the Basilica, this thesis initiates the procedure to obtain a complete visual and sound virtualization of the Basilica of Santa Maria and The Misteri d'Elx which has not been performed so far and will allow to interact from anywhere with both architectural heritage and intangible heritage related to it.

Resum

Els recintes de culte són espais de reunió en què l'acústica ha de ser adequada per a la intel·ligibilitat de la paraula, però també apropiada per a la música. Per aquest motiu és important conèixer el comportament acústic d'aquests espais en ambdós casos i les diferències que es produeixen en funció de l'activitat que s'està realitzant.

En aquest sentit, els models virtuals han demostrat ser un instrument molt eficaç per a l'estudi del comportament dels edificis enfront de diferents aspectes, i que permeten recrear les experiències sensorials que transmeten aquests espais.

La Basílica de Santa Maria és l'escenari en què cada any té lloc la representació del Misteri d'Elx, obra teatral medieval declarada Monument Nacional en 1931, inclosa en la primera Proclamació de les Obres Mestres del Patrimoni Oral i Immaterial de la Humanitat per la UNESCO en 2001, i inscrita en 2008 en la Llista Representativa del Patrimoni Cultural Immaterial de la Humanitat.

Donada la seua importància, tant la Basílica de Santa Maria com el Misteri han sigut objecte de nombrosos estudis. No obstant això, tots ells s'han centrat principalment en la història i evolució de la representació o l'aspecte formal de l'edifici deixant de costat l'acústica d'un espai en què el so resulta fonamental.

En aquest treball, mitjançant l'acústica virtual, es realitza un estudi exhaustiu del comportament acústic de la Basílica per als seus dos usos principals: la celebració del culte i la representació del Misteri d'Elx, analitzant la influència tant dels canvis que s'introdueixen en l'espai, com de la presència del públic, i identificant les singularitats de l'aplicació d'aquesta ferramenta en edificis històrics, i més concretament en recintes de culte.

A més a més, a partir de gravacions realitzades amb els cantors i l'escolania del Misteri, i de la construcció i texturització d'un model virtual de la Basílica, s'inicia el treball per a obtenir una virtualització completa, visual i sonora, de la Basílica de Santa Maria i el Misteri d'Elx, cosa inèdita fins al moment i que permetrà interactuar des de qualsevol lloc amb el patrimoni arquitectònic i el patrimoni immaterial vinculat a ell.

Índice

I. Introducción y objetivos	1
II. Antecedentes	7
II.1. La Basílica de Santa María de Elche	9
II.1.1. Importancia de la Basílica de Santa María y el Misteri.	10
II.1.2. Descripción arquitectónica	12
II.1.3. Evolución histórica.....	19
II.1.3.1. Los templos anteriores.....	19
II.1.3.2. Construcción y evolución del templo actual.....	22
II.1.4. La Basílica de Santa María como escenario del Misteri	42
II.1.4.1. Los templos anteriores.....	42
II.1.4.2. El templo actual.....	44
II.2. Acústica virtual en recintos de culto	47
II.2.1. La acústica en recintos de culto	48
II.2.2. Aplicación de la acústica virtual a recintos de culto.	50
II.2.2.1. Características arquitectónicas.....	51
II.2.2.2. Materiales.....	52
II.2.2.3. Posición de la fuente.....	53
II.2.2.4. Evaluación de la calidad acústica en recintos de culto.....	54
II.3. Parámetros acústicos de calidad de salas.....	55
II.3.1. Clasificación de los parámetros.....	56
II.3.2. Parámetros de reverberación	57
II.3.2.1. Tiempo de reverberación (RT).....	58
II.3.2.2. Tiempo de caída inicial (EDT).....	59
II.3.3. Parámetros de energía	61

II.3.3.1.	Claridad (C50 y C80).....	62
II.3.3.2.	Tiempo central (Ts)	63
II.3.3.3.	Fuerza sonora (G).....	64
II.3.4.	Parámetros de inteligibilidad	65
II.3.4.1.	Índice de transmisión de la palabra (STI)	65
II.3.5.	Parámetros de espacialidad	65
II.3.5.1.	Índice de correlación cruzada interaural (IACC)	65
II.3.5.2.	Índice de fracción de energía lateral (LF)	66

III. Metodología de la investigación..... 69

III.1.	Esquema general de trabajo	70
III.2.	Construcción de los modelos.	71
III.2.1.	Modelo para simulación acústica	71
III.2.2.	Modelo para simulación gráfica	72
III.3.	Medición in-situ de parámetros acústicos	73
III.3.1.	Equipos e instrumentación de medida	73
III.3.2.	Posiciones registradas	77
III.3.3.	Condiciones de medida.....	80
III.3.4.	Protocolo de medida	80
III.4.	Simulación acústica	81
III.4.1.	Software empleado	81
III.4.2.	Procedimiento	81
III.4.3.	Simulación de la Basílica en las condiciones de medida.....	81
III.4.4.	Simulación en condiciones diferentes a las de medida	85
III.5.	Análisis estadístico de resultados	85
III.6.	Auralización	87

IV. Resultados y discusión 89

IV.1.	Construcción de los modelos	91
IV.1.1.	Características de las simulaciones gráfica y acústica.....	92

IV.1.2.	Los primeros modelos	93
IV.1.3.	Los modelos finales	98
IV.1.4.	Conclusiones	100
IV.2.1.	La acústica de la Basílica para el culto.....	101
IV.2.1.1.	Configuración de la Basílica de Santa María para el culto.	102
IV.2.1.1.1.	<i>Descripción</i>	102
IV.2.1.1.2.	<i>Zonificación y características geométricas</i>	105
IV.2.1.2.	Posiciones registradas.....	106
IV.2.1.3.	Modelo acústico	107
IV.2.1.4.	Caracterización acústica de la Basílica para el culto y validez de la simulación	109
IV.2.1.4.1.	<i>Parámetros de reverberación</i>	109
IV.2.1.4.2.	<i>Parámetros de energía</i>	121
IV.2.1.4.3.	<i>Parámetros de inteligibilidad</i>	147
IV.2.1.4.4.	<i>Parámetros de espacialidad</i>	150
IV.2.1.5.	Conclusiones	161
IV.2.2.	La acústica de la Basílica para la representación del Misteri.....	165
IV.2.2.1.	Configuración de la Basílica de Santa María para el Misteri. ...	166
IV.2.2.1.1.	<i>Descripción</i>	166
IV.2.2.1.2.	<i>Zonificación</i>	169
IV.2.2.2.	Posiciones registradas.....	171
IV.2.2.3.	Modelo acústico para el Misteri	172
IV.2.2.4.	Caracterización acústica de la Basílica y validez de la simulación	174
IV.2.2.4.1.	<i>Parámetros de reverberación</i>	174
IV.2.2.4.2.	<i>Parámetros de energía</i>	189
IV.2.2.4.3.	<i>Parámetros de inteligibilidad</i>	218
IV.2.2.4.4.	<i>Parámetros de espacialidad</i>	220
IV.2.2.5.	Conclusiones	234
IV.2.3.	Variaciones en función del uso.....	237

IV.2.3.1.	Influencia de los cambios espaciales para los dos usos principales	238
IV.2.3.1.1	<i>Variaciones en los parámetros de reverberación</i>	239
IV.2.3.1.2	<i>Variaciones en los parámetros de energía</i>	246
IV.2.3.1.3	<i>Variaciones en los parámetros de inteligibilidad</i>	260
IV.2.3.1.4	<i>Variaciones en los parámetros de espacialidad</i>	262
IV.2.3.2.	Evaluación de la calidad sintética de la Basílica para la música y el habla.....	268
IV.2.3.3.	Influencia de la audiencia	271
IV.2.3.3.1	<i>Influencia del público en los parámetros de reverberación</i>	272
IV.2.3.3.2	<i>Influencia del público en los parámetros de energía</i>	282
IV.2.3.3.3	<i>Influencia del público en la inteligibilidad</i>	302
IV.2.3.3.4	<i>Influencia del público en los parámetros de espacialidad</i>	304
IV.2.3.4.	Conclusiones	314
IV.2.4.	Estudio de absorción acústica in situ.....	315
IV.2.4.1.	Importancia de la medición in-situ de los coeficientes de absorción en edificios históricos	316
IV.2.4.2.	Equipos e instrumentación de medida	316
IV.2.4.3.	Ensayos en laboratorio.....	318
IV.2.4.3.1.	<i>Validación del sistema de medida</i>	319
IV.2.4.3.2.	<i>Repetibilidad</i>	321
IV.2.4.3.3.	<i>Variables que influyen en los coeficientes de absorción.</i>	326
IV.2.4.4.	Protocolo de medida.....	329
IV.2.4.5.	Medidas en la Basílica de Santa María.....	329
IV.2.4.5.1.	<i>Posiciones registradas</i>	330
IV.2.4.5.2.	<i>Resultados obtenidos</i>	331
IV.2.4.6.	Conclusiones	334
IV.3.	Virtualización.....	335
IV.3.1	Virtualización en patrimonio	336
IV.3.2	Modelado y texturización de la Basílica de Santa María de Elche	336

IV.3.3	Integración con entornos de realidad virtual	348
IV.3.4	Conclusiones	351
IV.4.	Auralización.....	353
IV.4.1.	Auralización del habla.....	354
IV.4.2.	Auralización del órgano	354
IV.4.3.	Auralización del Misteri d'Elx.....	355
IV.4.3.1.	<i>Registro de la fuente cantada</i>	<i>355</i>
IV.4.3.2.	<i>Auralización de la fuente cantor en el entorno simulado</i>	<i>359</i>
IV.4.4.	Conclusiones	359
V. Conclusiones		361
V.1.	Conclusiones relativas a la caracterización acústica de la Basílica de Santa María.....	362
V.2.	Conclusiones r elativas a la v irtualización completa del M isteri d'Elx.....	363
V.3.	Futuras líneas de investigación	364
VI. Bibliografía		365
Índice de tablas		382
Índice de figuras		387

Anexos

- A1. Resultados de las medidas de parámetros.
- A2. Resultados de las simulaciones.
- A3. Resultados de las medidas de absorción.

Capítulo I.
Introducción y
objetivos

El interés por la conservación del patrimonio cultural tanto material como inmaterial ha aumentado notablemente en los últimos años a nivel internacional. El patrimonio cultural, además del valor que representa en sí mismo, constituye una fuente de crecimiento económico y social. El Plan Nacional de Investigación en Patrimonio, elaborado por el Instituto del Patrimonio Cultural de España, recoge su notable importancia como motor de desarrollo local y estímulo para el turismo así como la relevancia de la apropiación del mismo por parte de la sociedad, que se identifica con él, generando cultura y conocimiento entre sus individuos. Por otra parte, destaca la complejidad de su investigación por lo variado de las características y problemáticas de los bienes culturales, y porque en la conservación del patrimonio intervienen numerosos factores que hacen necesaria la aplicación tanto de las ciencias humanas como de las experimentales mediante equipos interdisciplinares.

La unión de realidad virtual y acústica ha generado en los últimos años un campo de trabajo bastante amplio, que ha tenido a nivel mundial una repercusión y producción muy considerable y con amplias perspectivas de futuro. Su aplicación en edificios con valor patrimonial resulta de gran interés para poder conocer la respuesta final del oyente ante la música o el habla que se percibe en dichos edificios. En este sentido, se trabaja para, a través de la realidad virtual, construir maquetas de estos edificios que permitan realizar, no sólo una reconstrucción visual del edificio, sino también conocer y por tanto digitalizar cómo suena la música o el habla en su interior o poder inferir cómo sonaba antes de las intervenciones a las que han sido sometidos a lo largo de su historia. Es precisamente para poder disponer de esta información sonora donde las técnicas de la auralización cobran mayor interés.

En el caso de la basílica de Santa María de Elche, el comportamiento acústico de la sala y las variaciones en el uso del espacio adquieren especial importancia ya que además del culto y la celebración de conciertos, es el escenario en el que cada año se representa el "Misteri d'Elx", obra teatral de origen medieval declarada Monumento Nacional en 1931 e incluida en la primera Proclamación de las Obras Maestras del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la Unesco en 2001, que condicionó la traza del templo y cuya representación constituye un ejemplo claro de la identificación de la población de Elche con su patrimonio.

La presente tesis es consecuencia de las investigaciones realizadas en el proyecto de investigación BIA2012-36896 del Plan Nacional I+D+i titulado: "Acústica virtual. Aplicación de protocolo de calidad acústica mediante entornos virtuales, como herramienta en proyectos de diseño, rehabilitación y en la acústica arqueológica del patrimonio material/inmaterial" desarrollado por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

Dentro del contexto del proyecto, y dada la relevancia de la Basílica de Santa María y el Misteri, el primer objetivo general de esta tesis es, la caracterización acústica de este espacio, en el que el sonido adquiere suma importancia, en sus dos configuraciones principales: la celebración del culto y la representación del Misteri, ya que, aunque ambos han sido objeto de numerosos estudios, todos ellos se han centrado en la historia y evolución de la representación o el aspecto formal del edificio dejando de lado el comportamiento sonoro.

Para ello, se han establecido una serie de objetivos específicos:

1. Establecer una metodología de trabajo concreta para llevar a cabo un análisis de las condiciones acústicas en recintos de culto mediante la acústica virtual.
2. Analizar el comportamiento acústico de la Basílica de Santa María de Elche para las dos actividades principales que tienen lugar en su interior.
3. Identificar las singularidades, ventajas y problemas que presenta la aplicación de esta herramienta en edificios históricos.
4. Proponer futuras líneas de investigación que permitan mejorar y optimizar los resultados.

Una vez estudiado en profundidad el edificio y sus diferentes etapas, se ha partido de la normativa, métodos, protocolos, parámetros, índices, datos, etc. obtenidos a partir del estudio de salas de conciertos, por ser estas las únicas herramientas existentes, ya que a pesar de que la problemática del sonido en los recintos de culto ha existido siempre, la aplicación la acústica virtual a este tipo de espacios es relativamente reciente.

Las diferencias entre las salas de conciertos y los recintos de culto son notables por lo que la adaptación de la forma de trabajo y la elaboración de protocolos de calidad propios resulta necesaria e indispensable. El proceso de aplicación de estas técnicas a la Basílica ha permitido establecer una serie de aspectos, detectados también en investigaciones similares, a tener en cuenta en recintos de culto históricos en los que se encuentran una gran cantidad de elementos singulares y propios de estos espacios, que no existen en las salas de conciertos y que, por tanto, requieren de estudios específicos para caracterizarlos y poder incluirlos en la simulación.

Una de las características que diferencian a los recintos de culto históricos de las salas de conciertos o teatros es su complejidad geométrica, la cual ha hecho necesario un trabajo previo en la construcción de los modelos que han sufrido una serie de cambios, adaptándose a los diferentes requerimientos de las simulaciones gráfica y acústica, solventando las dificultades encontradas en las etapas iniciales de la investigación. Por otra parte, se ha verificado también la necesidad de realizar un análisis por separado de las diferentes zonas o

subespacios que componen los edificios, dado que éstos presentan características geométricas y espaciales diferentes.

Los materiales son otro elemento diferenciador entre recintos de culto y salas de conciertos, aunque existen algunas fuentes para la obtención de materiales usados comúnmente en iglesias, elaboradas a partir de investigaciones similares a la que nos ocupa, los catálogos que incluyen características acústicas recogen materiales propios de la construcción actual y no de los edificios históricos. Por lo que la dificultad a la hora de caracterizar algunos de ellos ha hecho necesaria la realización de un estudio específico de absorción in situ en la Basílica.

El segundo objetivo general de la tesis es establecer las líneas de trabajo para la virtualización completa de la representación del Misteri d'Elx, para lo cual, es necesario tanto modelizar la Basílica como disponer de la señal anecoica de los pasajes cantados en la representación del Misteri para su auralización. Este último punto presenta gran complejidad ya que la obra incluye piezas a dos voces, tríos y cuartetos y piezas corales, y los cantores necesitan escucharse por lo que no es posible hacerles actuar de forma independiente en una cámara anecoica, ni a la agrupación completa. Para ello, se ha realizado por un lado, un trabajo de texturización del espacio interior de la Basílica y por otro, la grabación del Misteri completo en la sala de ensayo de la escolanía para su posterior dereverberación y obtención de la señal anecoica que se ha realizado para el caso de un a voz. La finalización de este trabajo permitirá alcanzar una virtualización completa, visual y sonora, de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx, algo inédito hasta el momento y que permitirá interactuar desde cualquier parte tanto con el patrimonio arquitectónico como con el patrimonio inmaterial vinculado a él.

La tesis se estructura en varios bloques, de la siguiente forma:

- Antecedentes.

Recoge la investigación bibliográfica previa llevada a cabo y los principales conceptos tenidos en cuenta en la investigación. Se estructura en tres capítulos. En el primero se incluye una descripción completa del objeto de estudio, la Basílica de Santa María, su evolución histórica y su relación con la representación del Misteri en sus distintas etapas.

El segundo capítulo hace referencia a la acústica virtual y las singularidades de su aplicación en recintos de culto a partir de un análisis de estudios similares llevados a cabo por la comunidad científica en los últimos años.

Por último, el tercer capítulo recoge la clasificación y definición de los parámetros acústicos de calidad de salas empleados en el desarrollo del trabajo.

- Metodología.

Se describen los criterios en los que se ha basado cada una de las etapas de la investigación, los programas, sistemas y equipos empleados y el método de trabajo seguido.

- Resultados y discusión.

Se ha estructurado en 6 capítulos. El primero de ellos recoge el trabajo realizado entorno a la construcción de los modelos gráfico y acústico de la Basílica. Los siguientes cuatro capítulos recogen los resultados relativos a medidas y simulación acústica. Tres de ellos hacen referencia a los parámetros acústicos de calidad de salas, analizando por un lado la Basílica en la configuración propia del culto; por otro lado, la acústica cuando ésta se encuentra preparada para la representación del Misteri; y realizando, por último, una comparación entre ambas. El cuarto incluye el trabajo que se ha desarrollado sobre medición de coeficientes de absorción in situ. Por último, se han incluido dos capítulos en los que se explican los procesos de texturización y auralización llevados a cabo para percibir con el mayor realismo posible, tanto visual como acústicamente, el espacio de la Basílica y la representación del Misteri.

- Conclusiones extraídas de la investigación.

- Bibliografía.

- Anexos.

Se incluyen los resultados de las medidas de parámetros, las simulaciones y las medidas de absorción.

Capítulo II.

Antecedentes

II.1.

**La Basílica de Santa
María de Elche**

II.1.1. Importancia de la Basílica de Santa María y el Misteri

La Basílica de Santa María es uno de los múltiples ejemplos de arquitectura religiosa barroca existentes en España. Este templo, comenzado a construir en la segunda mitad del siglo XVII, cuenta con varios elementos arquitectónicos y artísticos de indudable interés, pero su verdadera trascendencia radica en que es el escenario en el que cada año tiene lugar la representación del Misteri d'Elx.

El Misteri d'Elx es una obra teatral musical sobre la muerte, ascensión y coronación de la Virgen. Fue declarado Monumento Nacional en 1931, incluido en la primera Proclamación de las Obras Maestras del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO en 2001, e inscrito en 2008 en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad.

Se ha representado sin interrupción desde mediados del siglo XV en la Basílica de Santa María, constituyendo un testimonio vivo del teatro religioso europeo medieval y de la devoción a la Virgen.

Se celebra todos los años y consta de dos partes, que se interpretan los días 14 y 15 de agosto respectivamente y que describen la muerte y coronación de la Virgen mediante una serie de escenificaciones en el interior de la Basílica y procesiones en sus alrededores. Como es propio del teatro medieval, la escena se articula en dos planos: el horizontal que representa lo terrestre, y el vertical o celeste.

La primera jornada se denomina la Vespra, en ella, la Virgen y su cortejo entran en la Basílica de Santa María a través de la puerta principal y ascienden por una rampa, conocida como andador que recorre toda la nave hasta el escenario o cadafal colocado en el crucero. Desde la cúpula de la iglesia, que se cubre con una lona pintada como cielo, desciende un ángel que le anuncia su muerte. Los apóstoles entran en el templo y la acompañan en sus últimos momentos. Tras su muerte, el niño que la representa se sustituye por la imagen de la Virgen de la Asunción, patrona de la ciudad, y un segundo aparato ocupado por tres adultos y dos niños vestidos de ángeles, grupo conocido como Araceli, desciende desde la cúpula para recoger el alma de la Virgen, representada por una pequeña imagen, y ascender de nuevo al cielo.

En la segunda jornada se representa como un grupo de judíos que quieren impedir el entierro de la Virgen, luchan con los apóstoles tocando uno de ellos el cuerpo de la Virgen y quedando paralizado. Ante este hecho se convierten al cristianismo y son bautizados recuperando la movilidad y uniéndose a los apóstoles en una solemne procesión y dando sepultura a la imagen de la

Virgen. El Araceli desciende de nuevo para unir el alma con el cuerpo de la Virgen y llevarla al cielo resucitada.

Más de 300 voluntarios participan en la representación, cuyos preparativos duran todo el año y atraen a toda la población de la ciudad que la entiende como parte de su identidad cultural (UNESCO, s.f.; Patronat del Misteri d'Elx, s.f.) La figura II.1.1 muestra un momento de la representación en la Basílica.

Por ello, la Basílica de Santa María tiene una importancia especial, al tratarse de uno de los conjuntos arquitectónicos urbanos con mayor proyección social y cultural para el pueblo de Elche y que desde su construcción ha estado ligada a la historia y evolución de la propia ciudad y sus ciudadanos. Es un punto de reunión habitual para los habitantes de la población y un elemento imprescindible para la comprensión del Misteri, ya que no se puede imaginar el uno sin el otro (Ajuntament d'Elx, 2010). *“Buena parte del éxito de la Festa se consigue gracias a la envoltura arquitectónica del templo ilicitano.”* (Martínez y Martínez, 1990).

Dada su importancia, tanto la Basílica de Santa María como el Misteri han sido objeto de numerosos estudios. No obstante, todos ellos se han centrado fundamentalmente en la historia y evolución de la representación o el aspecto formal del edificio dejando de lado el comportamiento acústico de un espacio en el que el sonido resulta fundamental.



Figura II.1.1. Imagen de la Basílica durante la representación del Misteri (Patronat del Misteri d'Elx, s.f.)

II.1.2. Descripción arquitectónica

La Basílica de Santa María se encuentra en el centro histórico de Elche, en el interior de la Vila Murada. Ocupa el mismo lugar que los anteriores templos principales de la ciudad, ciñéndose a la trama urbana medieval y siguiendo la orientación característica de las iglesias cristianas con la cabecera hacia el este. El conjunto del edificio cuenta con dos partes, templo propiamente dicho y las dependencias anejas que incluyen la Capilla de la Comunión y la sacristía.

Se trata de una iglesia con planta de cruz latina. Tiene una sola nave, transepto y ábside. A ambos lados de la nave cuenta con cuatro capillas entre contrafuertes que se comunican entre sí generando una circulación perimetral que continúa en torno al ábside con la existencia de un deambulatorio a modo de girola, y se repite en las tribunas situadas sobre la girola y las capillas en la planta superior. El crucero está cubierto por una cúpula sobre tambor y pechinas. En el siglo XVII, en la Comunitat Valenciana, se opta por esta tipología de iglesia, con planta de cruz latina con una gran cúpula en el crucero y una sola nave espaciosa, ya que permite congregarse a un gran número de fieles para seguir la celebración de la misa y las predicaciones sin la molestia de los pilares (Romero y de la Calle, 2009).

En la esquina noroeste de la nave, sobre la primera de las capillas se encuentra la torre. Es de base cuadrada y se distinguen tres partes, el tercio superior sobresale por encima de las terrazas.

La Basílica cuenta con siete puertas, cinco en el templo y dos en las dependencias anejas. La Puerta Mayor está situada a los pies de la nave y abre a la Plaza de Santa María. Es obra de Nicolás de Bussi. Está formada por dos órdenes superpuestos, el inferior y principal es quíntuple asentado sobre cinco pedestales a cada lado. El orden secundario superior comprende un pedestal con dos columnas a cada lado y las esculturas de San Pedro y San Pablo como remate. En el centro se sitúa la puerta, sobre ésta una hornacina con la imagen de la Virgen de la Asunción rodeada de ángeles, y en la parte superior un segundo nicho más pequeño con la imagen de San José (Pomares, 2004).

En la misma plaza de Santa María, en el extremo de la torre, se abre una segunda puerta de pequeñas dimensiones que da acceso directo a la escalera de caracol de subida a la misma.

La puerta de San Agatángelo está situada en la segunda capilla del lado del Evangelio, da acceso a la Basílica desde la plaza del Congreso Eucarístico, donde antiguamente se encontraba el antiguo cementerio. Es también obra de Nicolás de Bussi y su construcción, al igual que la de la Puerta Mayor, está datada entre los años 1679 y 1682 (Sempere, 1993). Cuenta con un orden

principal inferior de pilastras corintias que culmina en un entablamento, un orden secundario superior y un frontón curvo partido. En ella está representado un ángel portando la palma y la corona de laurel atributos del martirio de San Agatángelo.

La puerta de San Juan Bautista se ubica en la segunda capilla del lado de la Epístola, dando a la calle de la Fira. En los dos extremos del crucero se encuentran la Puerta del Sol, al sur, y la del Órgano, al norte, bajo el instrumento del mismo nombre. La puerta de la Sacristía se encuentra ubicada en la ante-sacristía en el lateral sur, se abre a la calle Fira y comunica con la girola. Por último, la puerta del Santísimo, orientada a este, comunica la plaza de Santa Isabel con el zaguán y la Capilla de la Comunión.

La nave está dividida en cuatro tramos por pilastras de orden colosal con pedestales y capiteles corintios. Sobre ellas se asienta una potente cornisa que sirve de apoyo a la bóveda de cañón con lunetos sobre arcos fajones que cubre el espacio. El orden colosal enmarca los arcos de medio punto de las capillas y los balcones de las tribunas de la planta superior, cuyos huecos son adintelados y están decorados con motivos vegetales. Tanto los muros como la ornamentación y la bóveda son de piedra. En los lunetos se abren cuatro ventanas a cada lado resueltas con vidrieras.

Las capillas del segundo tramo carecen de advocación al contener las puertas de San Agatángelo y San Juan Bautista. Las otras seis están dedicadas a La Purísima, Las Ánimas y San Antonio en el lado de la Epístola y San Francisco Javier, en la base de la torre cuya escalera muerde uno de los ángulos, San Felipe Neri y San Joaquín, en el lado del Evangelio. En la girola hay otras tres capillas dedicadas a La Soledad, San Joaquín y Santa Ana y el Santo Cristo (Sempere, 1993). En el centro de la girola, a eje de la nave se encuentra la Capilla de la Comunión.

Tanto las capillas de la nave como las de la girola están cubiertas por bóvedas de arista y comunicadas entre sí a través de los contrafuertes mediante huecos en arco. Lo mismo ocurre con las tribunas de la planta superior.

Los cuatro huecos de las tribunas del ábside son iguales a los de la nave. Las tribunas se comunican entre sí a través de unos balcones que recorren el perímetro del transepto. El del lado del Evangelio se ensancha sobre la puerta para alojar el órgano. El Camarín de la Virgen se encuentra en la tribuna de cabecera, siendo la única que se abre al ábside mediante un hueco en arco de medio punto que queda incluido en el Retablo Mayor.

El ábside está cubierto por una bóveda de cuarto de esfera con lunetos y ventanas que repiten la solución de las de la nave. En el centro destaca un florón dorado.

El tambor de la cúpula del crucero se asienta sobre cuatro arcos torales con pechinas profusamente decoradas con los cuatro evangelistas, sus símbolos y otros ornamentos. En él se abren ocho ventanas con vidrieras. Está coronado por una cúpula dividida en ocho partes por nervios ligeramente resaltados y un gran florón central.

El pavimento de la planta baja es todo de mármol, incluido el ábside que está estructurado en dos niveles, en el primero se encuentra el altar y en el segundo el tabernáculo, también de mármol. La planta superior cuenta con un suelo de baldosa cerámica. Las figuras II.1 .2. a II.1.6 muestran diferentes imágenes del interior de la Basílica.

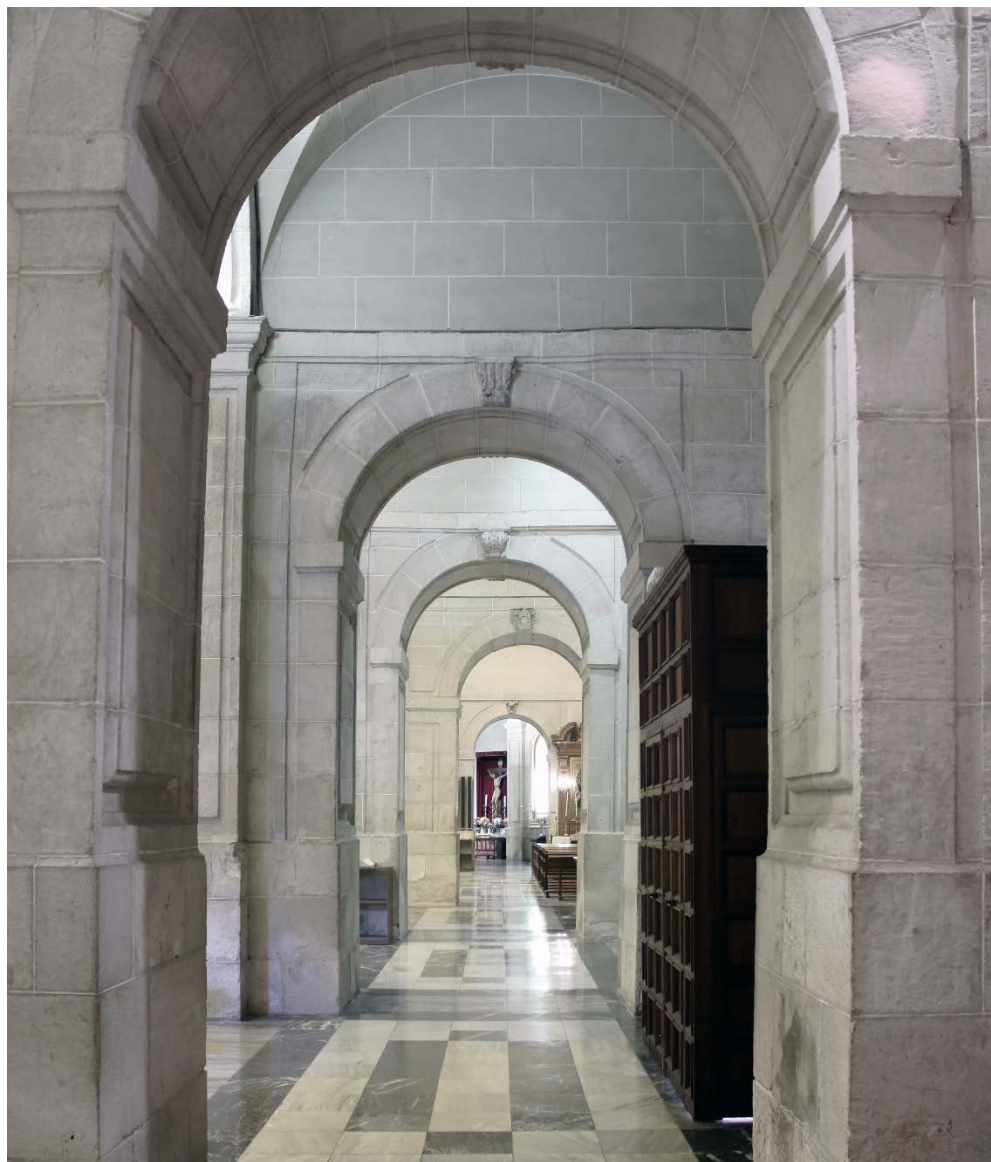


Figura II.1.2. Paso entre capillas mediante la perforación de los contrafuertes.



Figura II.1.3. Detalle de uno de los laterales de la nave.



Figura II.1.4. Detalle de la cornisa y bóveda del ábside.

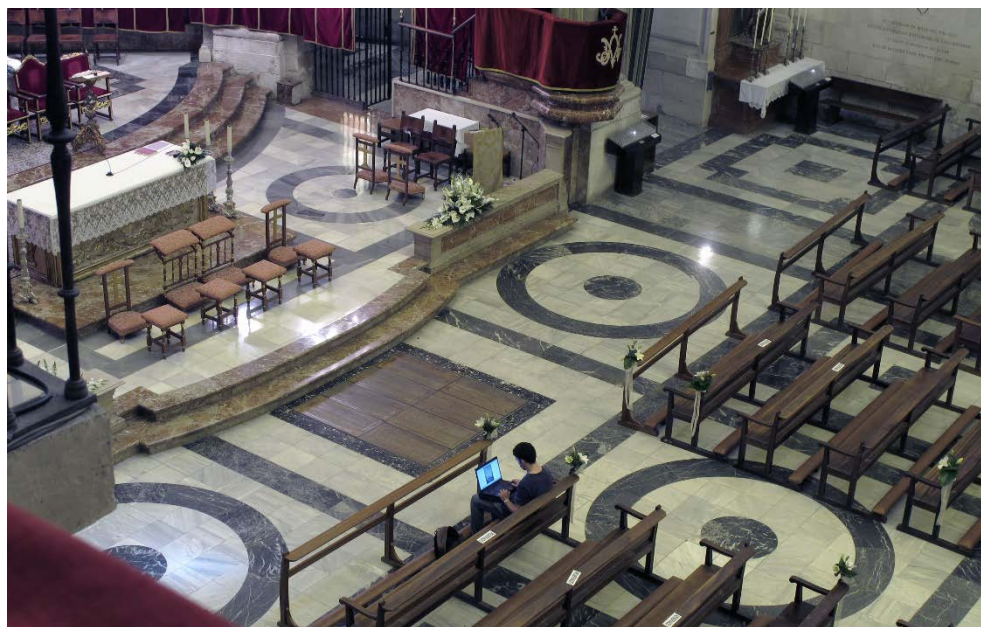


Figura II.1.5. Transepto desde uno de los balcones.



Figura II.1.6. Órgano, situado en uno de los extremos del transepto.

II.1.3. Evolución histórica

II.1.3.1. Los templos anteriores

La actual Basílica de Santa María es el cuarto templo construido en el mismo lugar en la ciudad de Elche. Durante la época de dominio árabe existía una mezquita que en 1264 fue convertida en templo católico, siendo bendecida por el Obispo de Barcelona Don Arnau de Gurb.

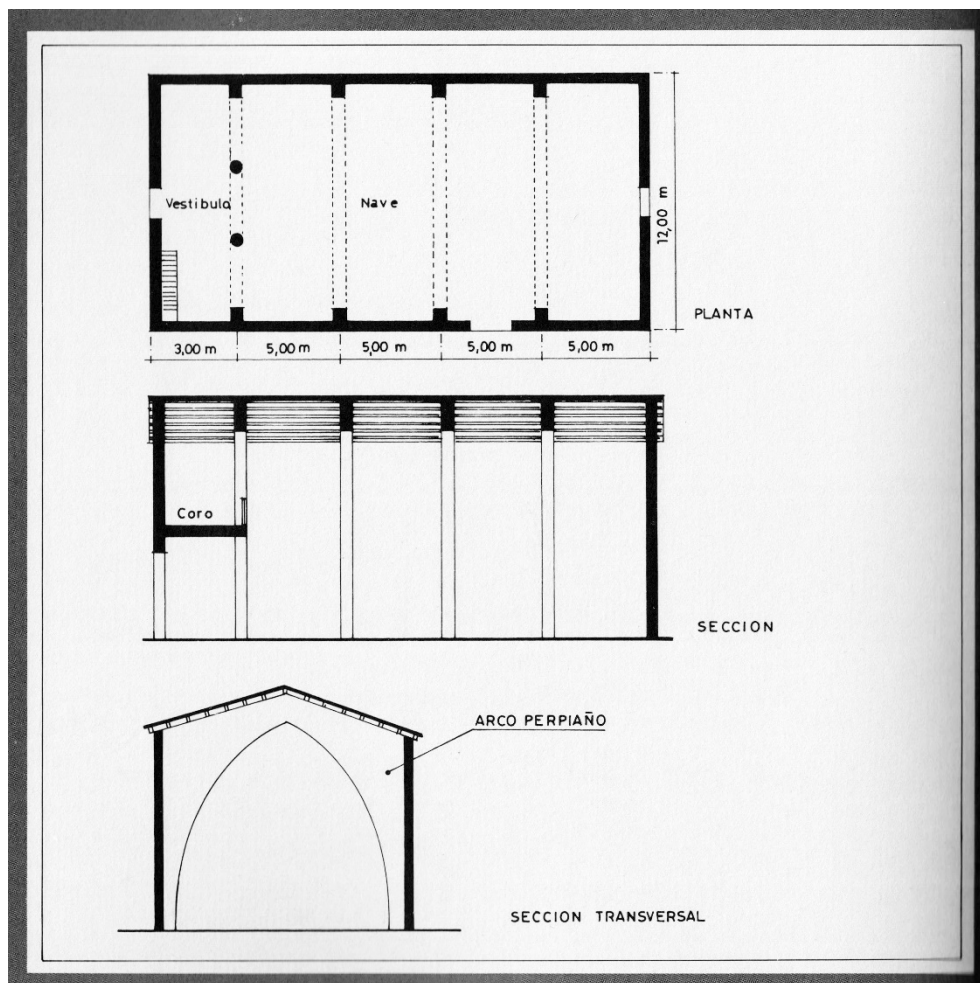


Figura II.1.7. Hipótesis reconstructiva de la iglesia construida en el siglo XIV (Martínez y Martínez, 1990).

En 1334 fue derribada la mezquita y se construyó la primera iglesia cristiana que se mantuvo en pie hasta 1492. La documentación sobre esta iglesia es prácticamente inexistente pero se cree que seguía el modelo típico de las iglesias de la reconquista, con planta rectangular y cubierta con entramado de madera y teja a dos aguas sobre arcos perpiaños, y ventanas en las paredes. Tendría una puerta en el extremo de oeste de la nave y sobre ella un coro. En el extremo este se encontraría un altar mayor elevado (Pomares, 2004).

Esta descripción encaja con la reconstrucción hipotética que los hermanos Martínez Blasco (1990) realizan de esta iglesia en su libro "La arquitectura como escenario del Misterio de Elche" y que se muestra en la figura II.1.7 para lo cual se basan en un escrito histórico que habla de arcadas. Otros autores también hacen referencia a este documento en el que se dice que la tercera arcada se pintó con bermellón mientras que las otras habían sido pintadas con almagra. Este templo se derrumbó hacia el año 1492 (Ramos, 1971).

En 1566 se terminó de construir un nuevo templo de una sola nave y estilo ojival que debía tener una altura considerable y a que en él se celebraba la tradicional Fiesta de la Asunción de la Virgen, con todos los aparatos mecánicos necesarios (Coquillat, 1903). Según Pedro Ibarra (1982), importante historiador e investigador llicitano, esta iglesia recordaba a la anterior. Probablemente cambiando los arcos diafragmáticos y la cubierta a dos aguas por arcos apuntados y bóvedas.

Es muy posible que su tamaño fuera el mismo que el de la nave de la actual Basílica de forma que se habrían podido reutilizar los cimientos, lo que era una práctica habitual y explicaría la rapidez con la que se levantaron los muros que hoy vemos. El cronista Cristóbal Sanz dice de ella que "era tan alta que causaba espanto y asombro a los forasteros" (Martínez y Martínez, 1990).

En cuanto a sus características, Javier Fuentes y Ponte (1887) la describe como de estilo gótico puro, con grandes ojivas y atrevidas arcadas sin cúpula ni nada parecido. José Pomares (2004) hace referencia a los documentos existentes en el archivo de Santa María de los que extrae que la iglesia era gótica, de planta cuadrangular, estaba construida sobre los cimientos de la anterior y constaba de una nave muy alta y esbelta con cuatro capillas a cada lado, estando la cuarta del lado izquierdo destinada a campanario. Contaba con una Puerta Mayor y otras dos accesorias que correspondían con las actuales puertas de San Agatángelo y de la Resurrección. Al fondo de la nave había un presbiterio hexagonal elevado con un retablo en el altar mayor. Tanto las capillas como el presbiterio tenían columnas con nervios que terminaban en arcos apuntados y tramados. Entre ellos había bóvedas de piedra plana y yeso y sobre éstas cubiertas de entramados de madera y un aterraza de

trespol a la que se accedía desde el campanario. Además afirma que la sacristía estaba situada detrás o al lado del presbiterio y se accedía a ella desde el lado de la epístola y que tendría ventanales cubiertos con vidrieras.

Al parecer hubo órgano desde el siglo XVI. Puede que anteriormente hubiera otro bastante inferior. La tribuna del órgano se situaría en una de las paredes laterales posiblemente la del presbiterio (Pomares, 2004).

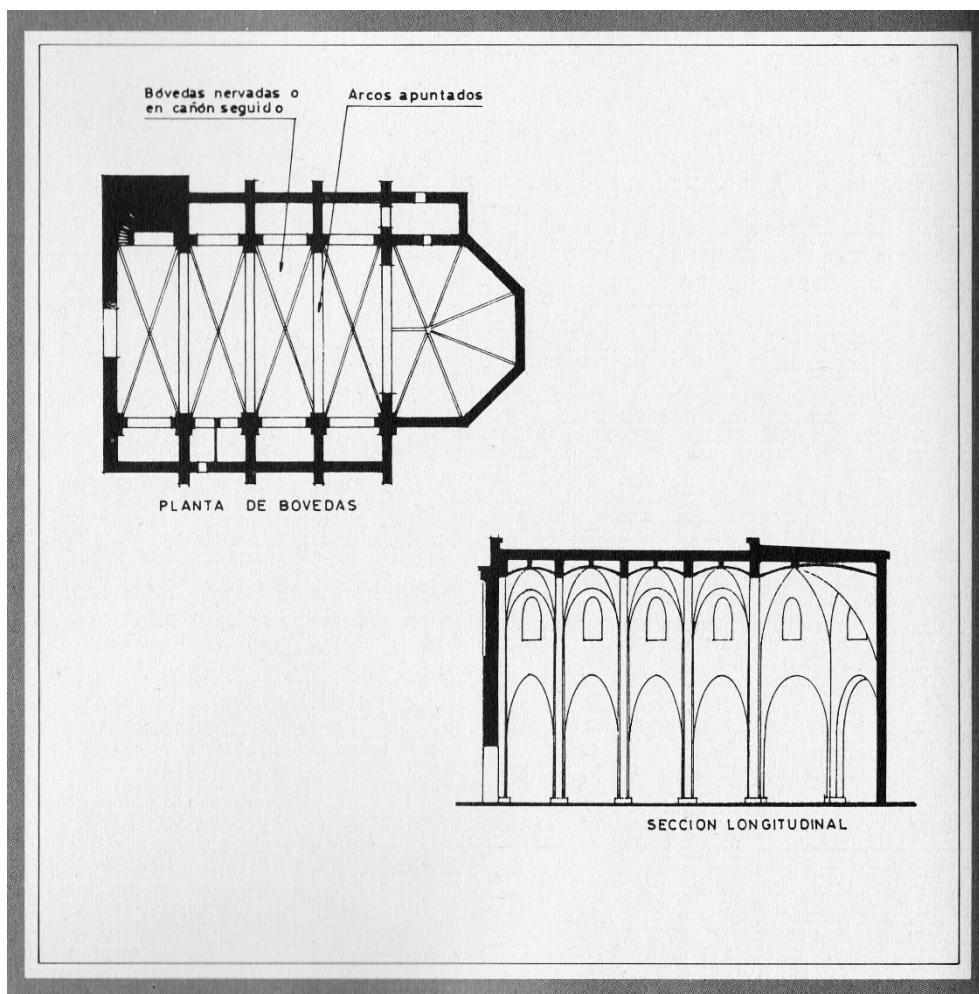


Figura II.1.8. Hipótesis reconstructiva de la iglesia construida en el siglo XVI (Martínez y Martínez, 1990).

Al igual que en el caso anterior y en base a los datos existentes, los hermanos Martínez Blasco (1990) realizan una hipótesis reconstructiva de esta iglesia gótica que se muestra en la figura II.1.8.

En el Archivo de Santa María se conserva un libro de Juntas Parroquiales de los años 1592 a 1699 a través del cual se puede seguir el proceso de envejecimiento y derribo de esta iglesia. En él se recoge, por ejemplo, que aunque bendecida en 1566, en el año 1572 no se había finalizado la construcción del campanario, y que en los últimos años del siglo XVI se realizaron numerosas obras en la arcada para reparar goteras. Los daños y reparaciones en la iglesia fueron continuos. En 1595 fue necesario construir un contraarco en la capilla de al lado del campanario para reforzar el edificio. En 1647 se informó del peligro de derrumbe del pilar en el que se encontraba la pila de agua bendita, que fue inspeccionado y reparado. En 1663 hubo que hacer lo mismo con el arco más próximo a la tramoya de bajada del ángel y dos años más tarde los informes insistían en el riesgo de derrumbe de la iglesia (Castaño, 2013).

Finalmente, en 1672, tras unas fuertes lluvias, se derribó la cubierta, encargándose el proyecto de la actual iglesia a Francisco Verde, arquitecto que estaba realizando las labores de apuntalamiento y derribo de las bóvedas en el momento del derrumbe y que sólo pudo comenzar la construcción del nuevo templo en julio de 1673, al fallecer al año siguiente. Desde entonces y hasta su finalización completa en marzo de 1778 se fueron sucediendo numerosos directores en la construcción. Los trabajos fueron lentos y presentaron numerosas dificultades, prueba de ello es que se necesitaron 13 años para llegar a cubrir la nave principal y 43 años para cubrir el crucero y terminar la cúpula (Coquillat, 1903).

II.1.3.2. Construcción y evolución del templo actual

En el año 2010 se llevó a cabo una exposición sobre la construcción de la Basílica en la que se mostraban numerosos planos e imágenes y se describía el proceso llevado a cabo tanto a la hora de construir la Basílica como en los sucesivos reconocimientos e intervenciones realizados. Del catálogo de dicha exposición se han tomado los datos que se han considerado relevantes para comprender el proceso de construcción y la vida del edificio hasta la actualidad complementándolos con datos extraídos de las memorias de los proyectos de intervención en la iglesia y otras publicaciones.

En la exposición se distinguen cuatro fases de construcción: la nave, el crucero, la Capilla de la Comunión y la Sacristía, y por último la construcción de la doble cúpula. La figura II.1.9 muestra las distintas fases constructivas en planta. La construcción de la Basílica comenzó por la nave. Entre 1673 y 1674 Francisco Verde trazó y comenzó la cimentación, labor que continuó Pere

Quintana. Entre 1674 y 1678 levantó los muros exteriores de la nave, cubrió las capillas laterales e inició el volteo de los arcos fajones.

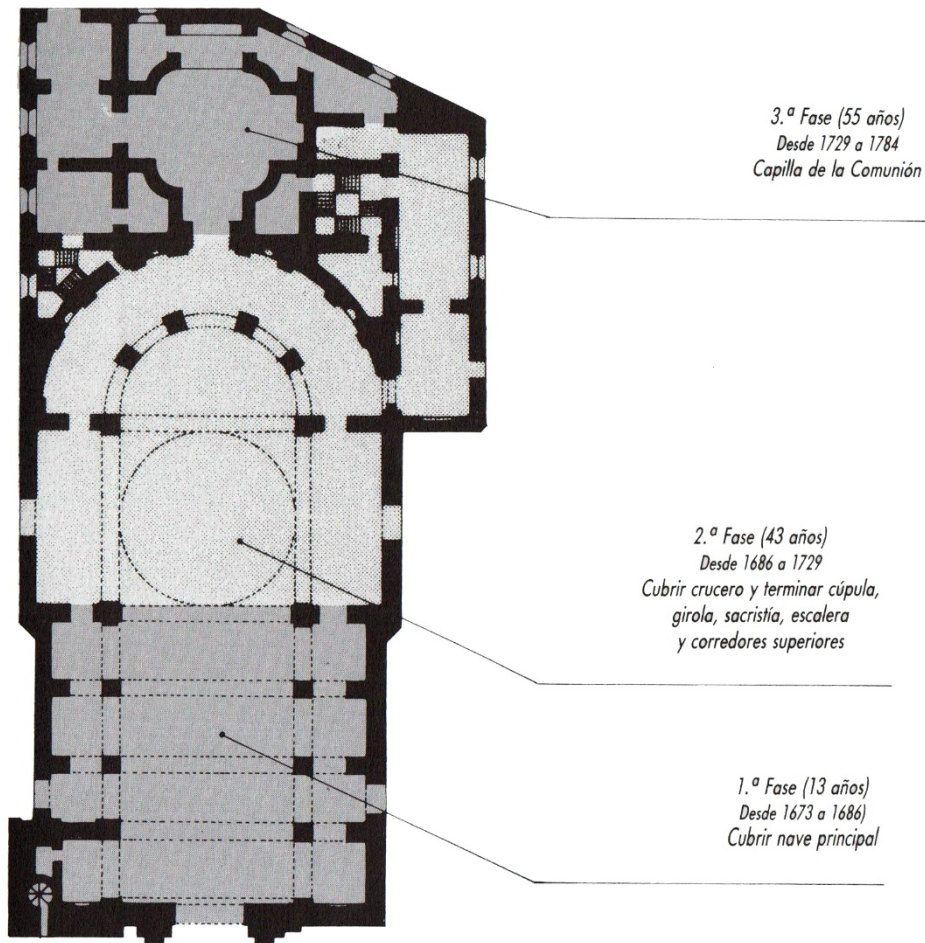


Figura II.1.9. Fases constructivas en la Basílica de Santa María (Martínez y Martínez, 1990).

Juan Fauquet y Verde fue el verdadero constructor de la Basílica, ya que fue él quien trabajó en ella durante más tiempo, entre 1685 y 1720. Llevó a cabo la construcción de las bóvedas de mampostería de la nave y en 1686 la cerró con un muro provisional a la altura del crucero para que pudiera ser utilizada

mientras se realizaban las obras en el crucero. En 1685 comenzó el trazado y construcción del crucero, la girola, la Capillas de la Comunión y las dependencias parroquiales. Todo ello se pensó como una unidad. En 1720 Fray Francisco Raimundo levantó la cúpula concluyendo la obra en 1727.

La construcción de la Capilla de la Comunión y la Sacristía fue comenzada por Marcos Evangelio en 1753. La doble cúpula fue trazada por Lorenzo Chápuli y levantada por José González de Coniedo.

Al igual que sus predecesoras, la Basílica de Santa María ha sufrido diversos problemas estructurales debidos a la mala calidad de las rocas calizas y el sistema constructivo por fases. Por ello, antes de haber finalizado la construcción de la Basílica se estaban llevando a cabo tareas de reparación. En 1732 el Consell solicitó a la Audiencia de Valencia los primeros reconocimientos. Los encargados de llevarlos a cabo fueron Salvador de Mora, Pedro Jumilla, Pedro Pagán y Lucas de los Corrales que concluyeron que las grietas de las partes altas se debían a las reparaciones efectuadas y que era posible cambiar las bóvedas de mampostería por otras más ligeras de piedra.

En 1747 se llevó a cabo un segundo reconocimiento llevado a cabo por los maestros arquitectos José Vilar de Claramunt y José Herrero y los maestros carpinteros Hipólito Ravanals y Sebastián Marques, por orden de la Real Audiencia de Valencia. De la inspección realizada se concluyó que el principal problema de la Basílica era el riesgo de colapso de los arcos torales y las pechinas. Como solución se propusieron varias medidas. En primer lugar, vaciar las pechinas y rellenarlas con yeso y piedra de río y posteriormente colocar los bloques para tallar las figuras de los doctores o evangelistas. En segundo lugar, aumentar el grosor del tambor solando seis palmos del mismo. En tercer lugar, trabar un pie de piedra entre las puertas del muro epístola para reforzarlo y enjarjarlo. En cuarto lugar, levantar las bóvedas del primer tramo de capillas de la girola sobre arcos que estriben en el pilar y seguir el mismo método en las restantes así como solar las tribunas. Además se propuso de nuevo reconstruir las bóvedas con piedra, rehacer los arcos de las capillas de la girola y en la puerta principal enjarjar un arco apuntado de piedra sobre la hornacina, quitar las columnas salomónicas y sustituir las piedras con salitre.

En mayor de 1751 cayeron trozos de piedra en el crucero, esto ya había ocurrido unos años antes en 1746 como consecuencia de un terremoto y llevó al obispo a solicitar un nuevo reconocimiento que llevaron a cabo Pedro y José Pardo y Miguel Francia. El objeto de la visita era determinar el grado de firmeza y solidez de la iglesia, si debido al terremoto de 1746 había experimentado mayor desplome y si deberían reconstruirse las bóvedas utilizando piedra en caso de desmontarlas.

Se determinó que los cuatro arcos torales y la cúpula “...se hallan contruidos con todo arte, con los gruesos y estribos y los torales con piedra de mejor calidad y fortaleza que los restantes que se bastan para sostener la media naranja que no apoya sobre el resto (arcos de la gloria) por haver previsto el maestro que eran de piedra de peor calidad que desprenden costras superficiales que hay que reconocer todos los años que no pueden debilitar la obra...” (Ajuntament d'Elx, 2010:34)

En cuanto a las bóvedas se dedujo que eran firmes pero al estar contruidas con mampostería contaban con una trabazón menor que las de ladrillo y con el tiempo podrían ocasionar problemas por lo que se recomendaba reconstruirlas con ladrillo doble.

Se recomendó “...acuñar y perfeccionar los arcos por el estremecimiento del terremoto...” (Ajuntament d' Elx, 2 010:34) y el iminar y r ecortar m olduras y recalados en los arcos torales y las tallas de las pechinas por ser el origen de los desprendimientos. Por último se estableció que los muros y estribos tenían el grosor y firmeza ad ecuados y q ue los de l norte y m edio día q ue se encontraban desplomados no corrían riesgo.

Las conclusiones del informe eran opuestas a las de 1745 que concluía que la iglesia estaba en riesgo de ruina, por lo que no despejó las dudas respecto a la estabilidad del edificio a pesar de estar realizado por arquitectos conocidos en el momento.

En 1752 se realizó un nuevo reconocimiento por parte de Gaspar Cayón, quien dirigía la obra de la nueva catedral de Cádiz y trabajaba en la cúpula del trascoro y contraportada de la catedral de Murcia. El informe que realizó se considera el precedente del que desarrolló y llevó a la práctica Marcos Evangelio. Cayón determinó que la iglesia no amenazaba ruina y estableció una serie de medidas para evitar las grietas, entre ellas colocar tirantes de hierro sobre los arcos torales y los fajones de los pies, eliminar las grietas de las bóvedas debidas al fraguado del yeso macizando las juntas, reparar las dovelas desprendidas limpiando la argamasa de unión y colocándolas en su sitio al modo descrito por Fray Lorenzo de San Nicolás en su Arte y uso de la Arquitectura. Por último, determinó que las grietas de las bóvedas no procedían de los cimientos sino de ellas mismas.

A pesar de los informes tranquilizadores, en 1753, debido a intereses personales por intervenir en la reparación de la Basílica se solicitó un nuevo informe, en el que participaron algunos de los que habían defendido el peligro de ruina de la iglesia y que volvieron a dictaminar que el problema se encontraba en la cimentación. Con ello se pretendió realizar un proyecto que incluía estrechar las capillas, eliminar las bóvedas de piedra y arruinar el

órgano entre otras operaciones, y que fue frenado por el obispo al dirigirse directamente al rey.

El informe definitivo que dio paso a la ejecución de las obras de reparación en la Basílica lo realizó Marcos Evangelio en 1753, tras consultar los reconocimientos de 1745 y 1753 y con las plantas que en su día había diseñado Juan Fauquet y Verde. Las conclusiones del informe incluían que el arco toral se hallaba en mal estado por el tiempo que había estado sin cubrir, lo que había provocado el deterioro de la argamasa de unión de las dovelas y que éstas se moviesen y quebrasen. Lo mismo ocurría con la cornisa, pechinas y anillo del arco toral. Las grietas de las ventanas de la cúpula, no obstante, se debían su poco grosor. El informe defendía también que los otros tres arcos torales estaban perfectos dado que la cúpula estaba soportada íntegramente por ellos y que los arquitectos de los reconocimientos anteriores se habían equivocado al confundir la falta de pulido de las dovelas para mejorar la traba con roturas. Lo mismo ocurría con los arcos fajones. Y establecía como causa del desplome de los muros el empuje de las bóvedas unido a la mala calidad de la piedra y su traba, justificando que en caso de que la cimentación fuera la causa no seguirían en pie.

Marcos Evangelio estableció una serie de reparaciones como desmontar el arco toral y repararlo, derribar las bóvedas y reconstruirlas junto con los arcos, rehacer las jambas de las ventanas del tambor, macizar el nicho de la puerta principal, correr la cornisa de otra puerta, carenar los arcos del cuerpo de la iglesia de pilastra a pilastra, intervenir en la cimentación del muro que mira a medio día, tapar las grietas... Todo ello descrito minuciosamente.

Por otra parte resumió las obras necesarias para la finalización de la iglesia: concluir la torre con chapitel, hacer las 21 bóvedas de las capillas del cuerpo y girola de piedra, los arcos con piedra de cantera de las Salinetas, construir un nuevo tabernáculo, las cinco de la girola y nueve retablos, continuar con las obras de la Capilla de la Comunión. Además se encargó de realizar el dibujo del lienzo para cubrir la media naranja por la que descienden las tramoyas en la representación del misterio.

En 1902 la cúpula presentaba grandes grietas y humedades. El anillo del tambor llegó a ceder 25 cm, la pechina de San Marcos y el arco toral que la sostenía se habían deformado. Por todo ello se decidió desmontar la cúpula. El proyecto fue obra de Marceliano Coquillat, la figura II.1.10 muestra uno de los planos, y recoge una serie de descripciones y conclusiones de gran interés para el conocimiento de la iglesia y lo ocurrido en ella hasta el momento:

“Primero. La Iglesia de Santa María de Elche es un magnífico templo, celebrado desde su construcción por las condiciones de capacidad, grandiosidad y belleza que le prestan el armonioso

conjunto de sus líneas elegantes y airoas; estando reputado como uno de los más suntuosos y ricos de España, en su estilo. Se halla completamente aislado, ocupando una superficie aproximada de 2225 metros cuadrados.

Es todo de piedra de sillería, hallándose inspirada su traza y la disposición de sus molduras y adornos, en los estilos clásicos de la antigüedad, si bien que por reflejar en muchos detalles el gusto reinante en la época en que se proyectó, resulta del género barroco.

Segundo. A causa de haberse ideado ese templo con tan espléndidas dimensiones en superficie y altura, resultó que por ser tan crecido el coste de sus obras, éstas, por falta de cantidades para llevarlas a cabo tuvieron que irse realizando por secciones, con gran lentitud, llegando a mediar un espacio de tiempo tan considerable como lo es el de ciento once años entre el día que se colocó la primera piedra, en 2 de julio de 1673, y el de la terminación completa, en 2 de octubre de 1784.

De aquí que, si bien no se resintió el conjunto de falta de homogeneidad, las partes de la construcción no podían resultar todas de igual solidez y resistencia, pues habían de unirse muros y arcos nuevos, a los que habían estado ya un regular número de años expuestos a las incidencias atmosféricas.

Esto fue, sin duda, una de las causas por las que el repetido arco toral de la nave se resintiera más que los otros tres de los efectos del peso que se les colocó encima, manifestando él sólo alguna grieta a los once años de construida la cúpula, y cuando aún para acabar toda la fábrica se pasaron cuarenta y cuatro años.

Tercero. Por los documentos citados se deduce la importancia que nuestros antepasados dieron a las primeras señales de rotura que presentó el tantas veces citado arco toral, por cuanto en solos trece años (de 1745 a 1758) reconocieron la iglesia, que sepamos, catorce o quince peritos entre Maestros prácticos y Arquitectos (...)

Y ahora cabe preguntar: ¿Qué obras se realizaron de las propuestas por los peritos del año 1745, de las que aconsejó Evangelio en 1758 y de las indicara D. Juan Carbonell en 1791?

Creo poder asegurar que de las más importantes (a excepción de las del subsuelo que no he examinado) no se realizó ninguna. Comprueban mi afirmación, el arco toral quebrantado que es el mismo primero que se construyó, al igual que los arcos y bóvedas de la nave, los encarreronados o tabiques sobre estas bóvedas, las bovedillas y el pesado trespol del terrado, y la fachada principal que no han sufrido modificación alguna.

Sólo se hicieron obras formales de consolidación cuando los terremotos de 1829 agravaron el mal y se temió un fin próximo para el templo. Desde entonces y hasta hoy sólo se habrá hecho alguna que otra pequeña reparación en los terrados, para evitar que las aguas de lluvias penetraran en la iglesia.” (Coquillat, 1903, p. 29-30).

Marceliano Coquillat propuso cimbrar los cuatro arcos torales, colocar un andamiaje que permitiera apeaar la cúpula, reforzar los torales con pilastras y arcos de hierro e instalar un tirante de hierro en sentido horizontal bajo cada arco toral para sujetar los machones, desmontar la nave y montar otra con armaduras de hierro, reconstruir las bóvedas tabicándolas con tres gruesos de rasilla, reparar los dinteles de las ventanas del tambor y sustituir la cúpula de sillería por otra más ligera tabicada de tres gruesos de rasilla y doble bóveda.

A finales de mayo de 1903 llegó la madera para las cimbras y en julio de ese año estaban instaladas en los cuatro arcos torales. En febrero de 1904 se reforzaron los arcos de las galerías de las tribunas con ladrillo, estos refuerzos debían tener el mismo ancho que el muro del arco y un espesor no superior a 45 ó 50 centímetros por cada lado y no superior a 15 centímetros por lado en el arco toral.

En noviembre de ese mismo año se revisaron las bóvedas de la nave para comenzar las obras y se descubrió que el arco de las ánimas estaba en mal estado por lo que se decidió apearlo con una cimbra que se instaló en 1904 y reconstruirlo. Se sustituyeron 14 dovelas del arco, cada una de ellas medía 90 cm de ancho y 80 de alto y se reparó individualmente. El proceso consistió en extraer primero una mitad que se sustituía por cemento rápido y ladrillos y una vez secado se procedía a hacer lo mismo con la otra mitad de la dovela. También se reparó el terrado de la nave.

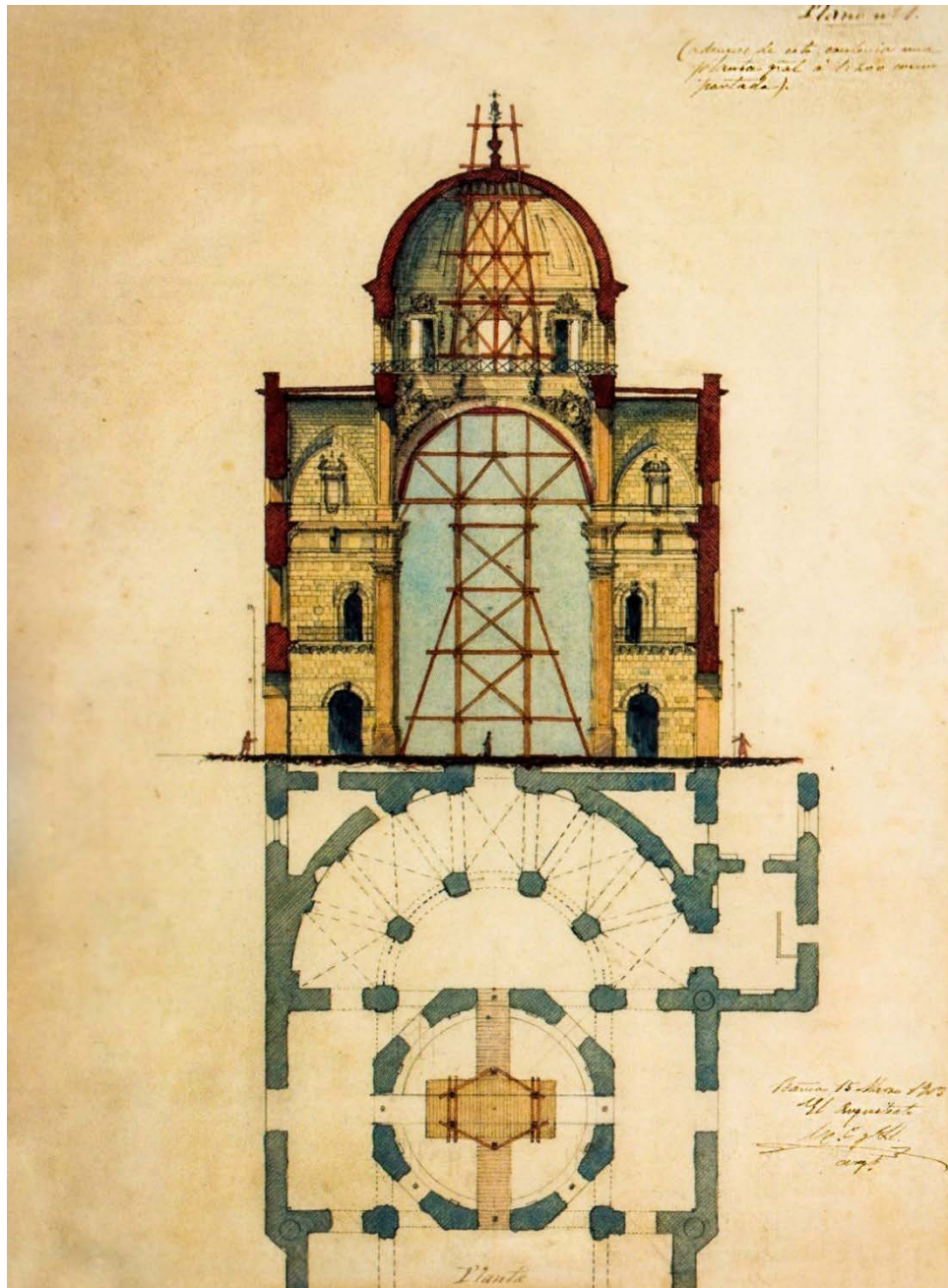


Figura II.1.10. Plano original de la sección transversal del crucero de Marceliano Coquillat (Ajuntament d'Elx, 2010).

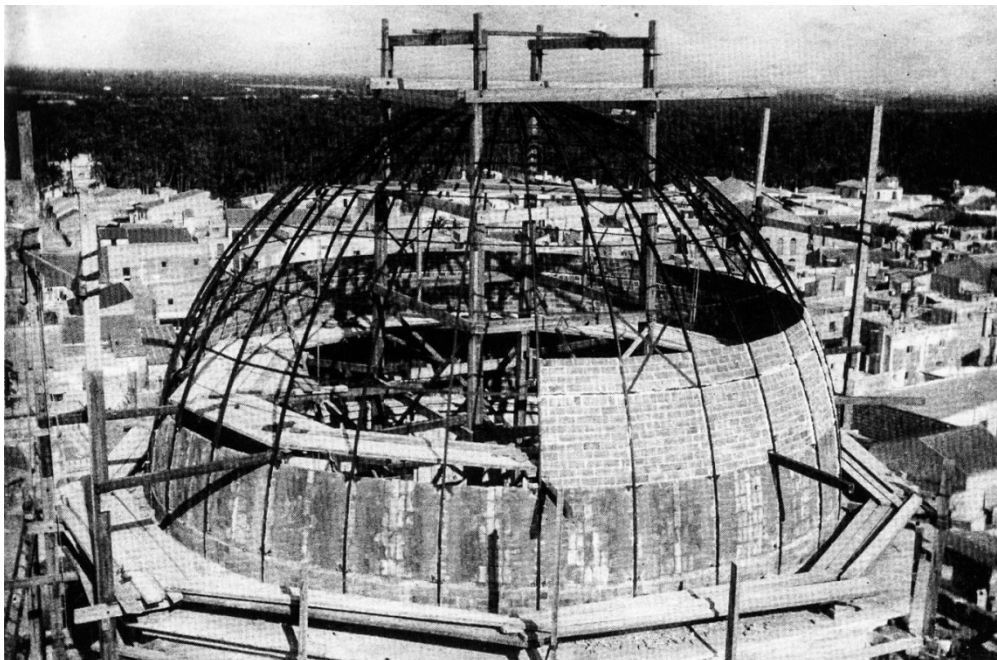


Figura II.1.11. Construcción de la nueva cúpula (Ajuntament d'Elx, 2010).

La construcción de la nueva cúpula se llevó a cabo en tres fases: demolición de la cúpula original, reparación del tambor y construcción de la nueva. El objetivo era sustituir la pesada cúpula de piedra por una tabicada más ligera. Las obras de demolición comenzaron en 1904, se quitó la teja y después la piedra por hiladas. En 1905 se desmontó el ángulo noroeste del tambor para eliminar todo el peso posible del arco toral roto. Los sillares se desmontaron y rebajaron para dejar hueco el interior del pilar y se niveló la cornisa. En abril de ese año se celebró el Misteri pese a las obras asistiendo el rey Alfonso XIII. La nueva cúpula contaba con una armadura de hierro formada por 28 meridianos y 10 paralelos. Los meridianos estaban constituidos por viguetas de hierro laminado doble, de 8 cm de altura, los paralelos eran hierros planos de varias medidas. En el espacio entre el segundo y tercer meridianos se dispusieron hierros planos en aspa para darle más solidez. El diámetro de la armadura era de 14,54 metros. La armadura se cubrió con cuatro capas de rasilla con un espesor aproximado de 10 cm y teja plana, obteniendo una cúpula ligera y sólida que de aspecto era muy similar a la antigua. La figura II.1.11 muestra dos fotografías del proceso constructivo.

En febrero de 1936 la Basílica fue incendiada quedando en muy malas condiciones. El fuego produjo daños estructurales en las bóvedas, siendo necesaria prácticamente la restauración total de las plementerías y parte de las dovelas de los arcos. Además, se destruyó toda la ornamentación, especialmente el camarín y el retablo mayor, el órgano y todos los altares con sus retablos.

Con el fin de restaurarla se creó la Junta Restauradora del Misterio de Elche y de sus Templos que encargó el proyecto de restauración a Antonio Serrano Peral. El proyecto que realizó incluía distintas partes de la edificación como la reparación de las fábricas y la reconstrucción de la ornamentación, pero también la de las tramoyas y demás elementos de la "Festa".

La memoria del proyecto recoge el criterio empleado por Serrano a la hora de intervenir en el edificio:

"Por el destino de este edificio, causas que han motivado su estado de deterioro y por ser un monumento vivo y en uso, después de meditados raciocinios, hemos adoptado un criterio ecléctico. Por eso en unas partes restauraremos, en otras repararemos y en otras consolidaremos. No es este el momento de justificar si es mejor para nuestro caso, al seguir las tendencias restauradoras de Viollet-le-Duc, Dn. Vicente Lampérez y otros al final del siglo pasado, o las de reparación y consolidación de la Conferencia Internacional de Peritos, para el estudio de los problemas referentes a la protección y

conservación de los Monumentos Artísticos e Históricos, organizada por la Oficina Internacional de Museos y celebrada en Atenas en octubre de 1931, de mi profesor Torres Balbás, o de los señores Gómez Moreno y Francisco Giner de los Ríos. En todos los casos y momentos, guía nuestras decisiones estas doctrinas, las de la escuela italiana representada por Boito y Giovannoni y las normas de la reciente Exposición de Arte Sacro de Victoria, Arzobispado Español y los Sagrados Cánones, y sobre todo el máximo respeto al monumento tal y como era, y el deseo vivamente sentido de restituir a Elche algo de lo que teníamos antes que la tea de los incendiarios con bastardo fin lo destruyese." (Serrano, 1940).

Del mismo modo hace referencia a los materiales y métodos constructivos empleados:

"Las cornisas, frisos, arquivoltas, ménsulas, capiteles, etc. Etc. Tanto interiores como exteriores, así como las guarniciones de las ventanas y tribunas, y en general toda la ornamentación que cubre los paramentos, se construirá como antes hemos indicados de igual piedra que lo está la Iglesia, y de la cantera a la que ella dio nombre.

Se empleará el hormigón armado para los refuerzos y suturas en el interior de los muros y colados e inyecciones de cemento fluido en aquellos sitios que lo requiera." (Serrano, 1940).

Se limpiaron los muros que habían quedado ennegrecidos a causa del fuego y el humo. En el caso de la cúpula fue necesario picar el estuco de yeso que se había colocado en 1907 y se substituyó por un revestimiento de cemento que es el que se observa en la actualidad por considerar que el yeso podía atacar a la estructura metálica (Serrano, 1940). En uno de los laterales de la nave se dejó una muestra del estado que presentaban los muros tras el incendio.

La cornisa de arranque de la cúpula requirió refuerzos de hormigón armado y la media naranja se restauró reponiendo el estuco y reconstruyendo el florón dorado.

Como se ha comentado, en sucesivas ocasiones se había aconsejado desmontar y reconstruir las bóvedas de la nave para aligerarlas. No obstante, por falta de recursos no se había hecho. Las bóvedas antiguas de

mampostería fueron completamente desmontadas y sustituidas por unas de sillería. También se realizaron diversas reparaciones en el terrado.

Las figuras II.1.12 a II.1.18 muestran algunos de los planos que formaban parte del proyecto de Antonio Serrano Peral en 1940 y que se incluyeron en la exposición citada anteriormente.

La figura II.1.19 muestra dos imágenes de los procesos de desmontaje y reconstrucción de las bóvedas.

El proyecto de 1940 también hizo referencia a la necesidad de intervenir en el exterior de la Basílica, pero sólo se renovaron las cornisas del lado de la sacristía. En 1971 se repararon las que recaen sobre la puerta de San Juan y a partir de 1978 se estableció un plan de restauración que llevado a cabo por Antonio Serrano Bru que incluyó la restauración de cornisas, la capilla de la Comunión y las puertas Mayor, de San Agatángelo y del Sol.

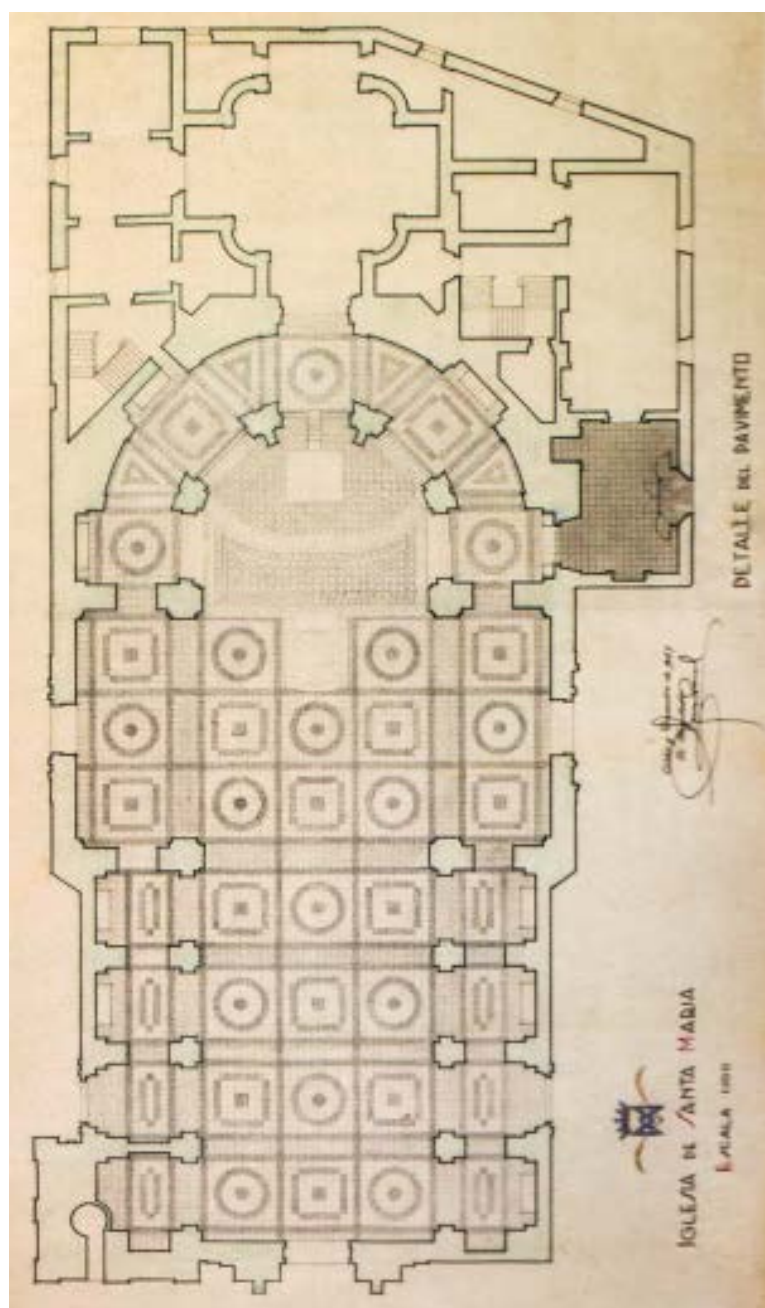


Figura II.1.13. Plano de pavimento. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).

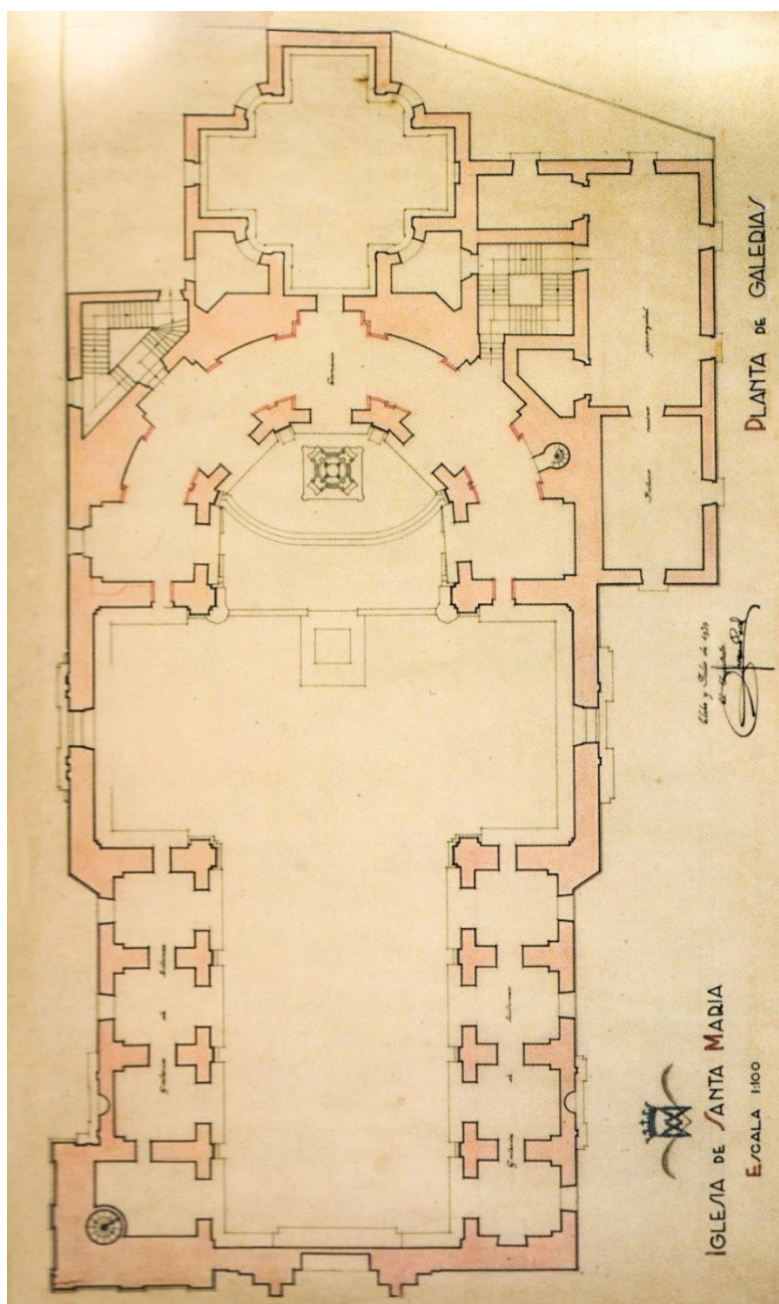


Figura II.1.14. Plano de la planta superior. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).

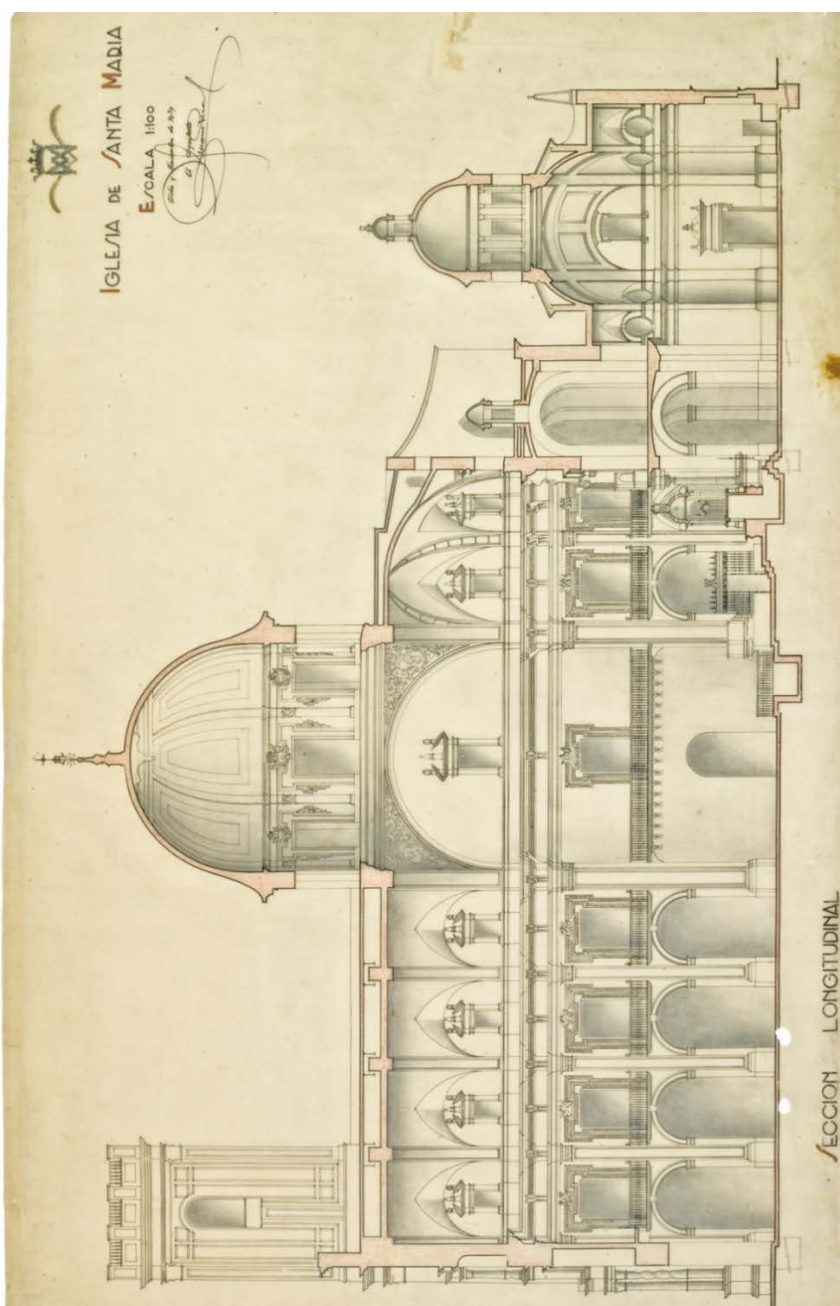


Figura II.1.15. Plano de sección longitudinal. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).



Figura II.1.16. Plano de sección transversal. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).



Figura II.1.17. Plano de detalle del retablo mayor. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).

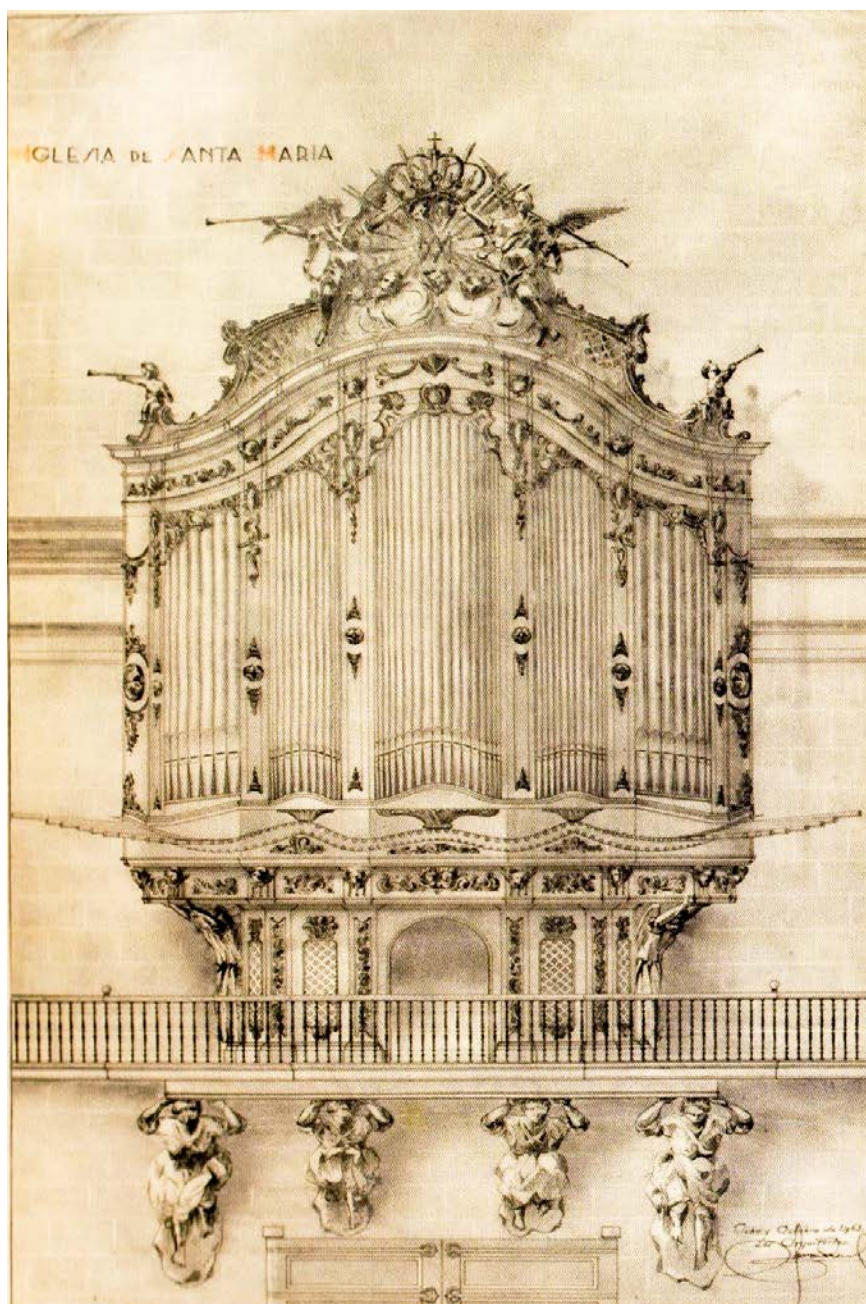


Figura II.1.18. Plano de detalle del órgano. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).

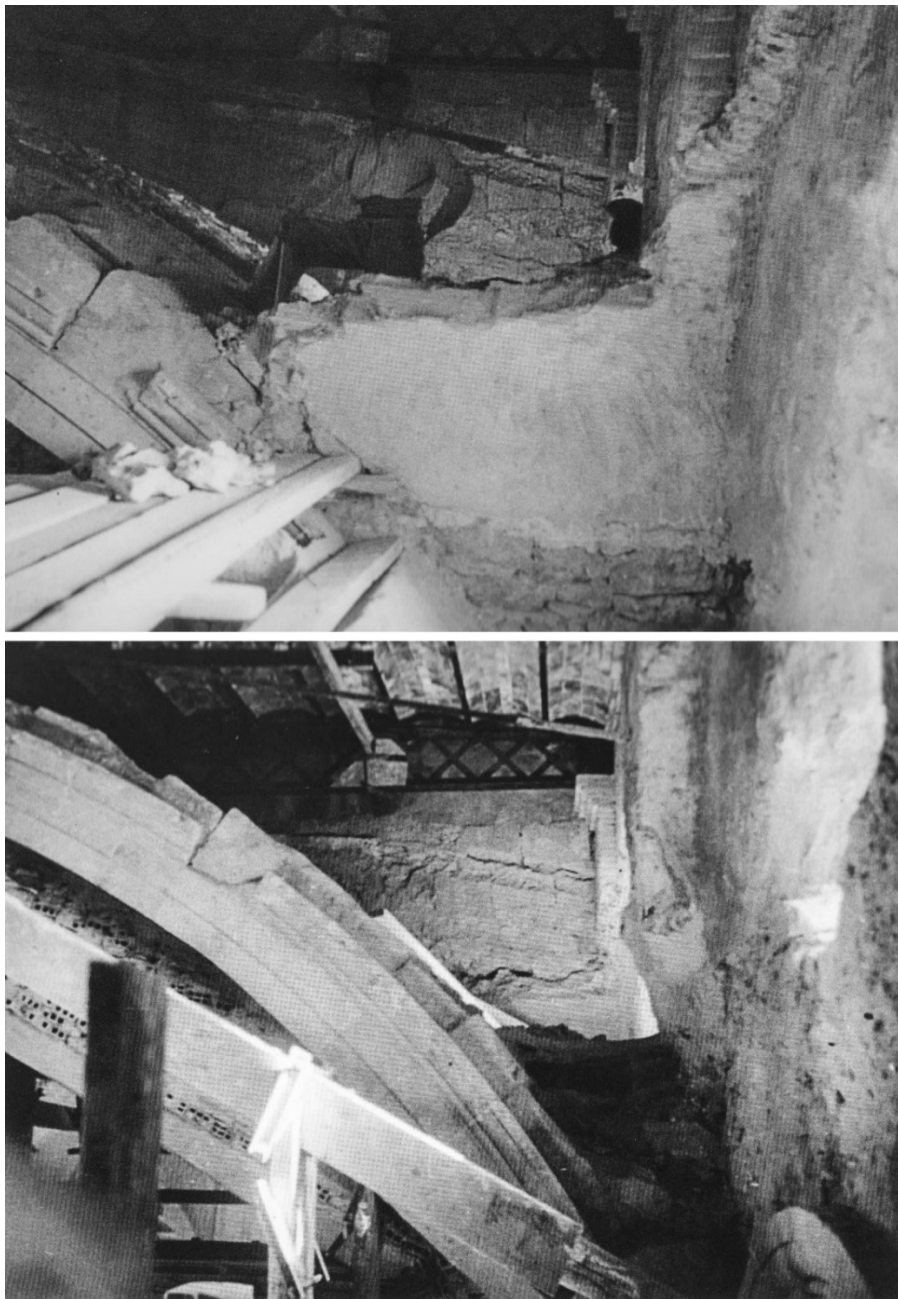


Figura II.1.19. Fotografías del desmontaje y reconstrucción de las bóvedas (Ajuntament d'Elx, 2010).

II.1.4. La Basílica de Santa María como escenario del Misteri

II.1.4.1. Los templos anteriores

Las investigaciones realizadas hasta el momento sitúan la representación del Misteri ya en la iglesia de 1334, colocando un plano inclinado desde el suelo a una plataforma situada en el centro de la nave, y un segundo plano inclinado por el que ascendería la Virgen hasta el coro, en el que situaría el cielo (Pomares, 2004).

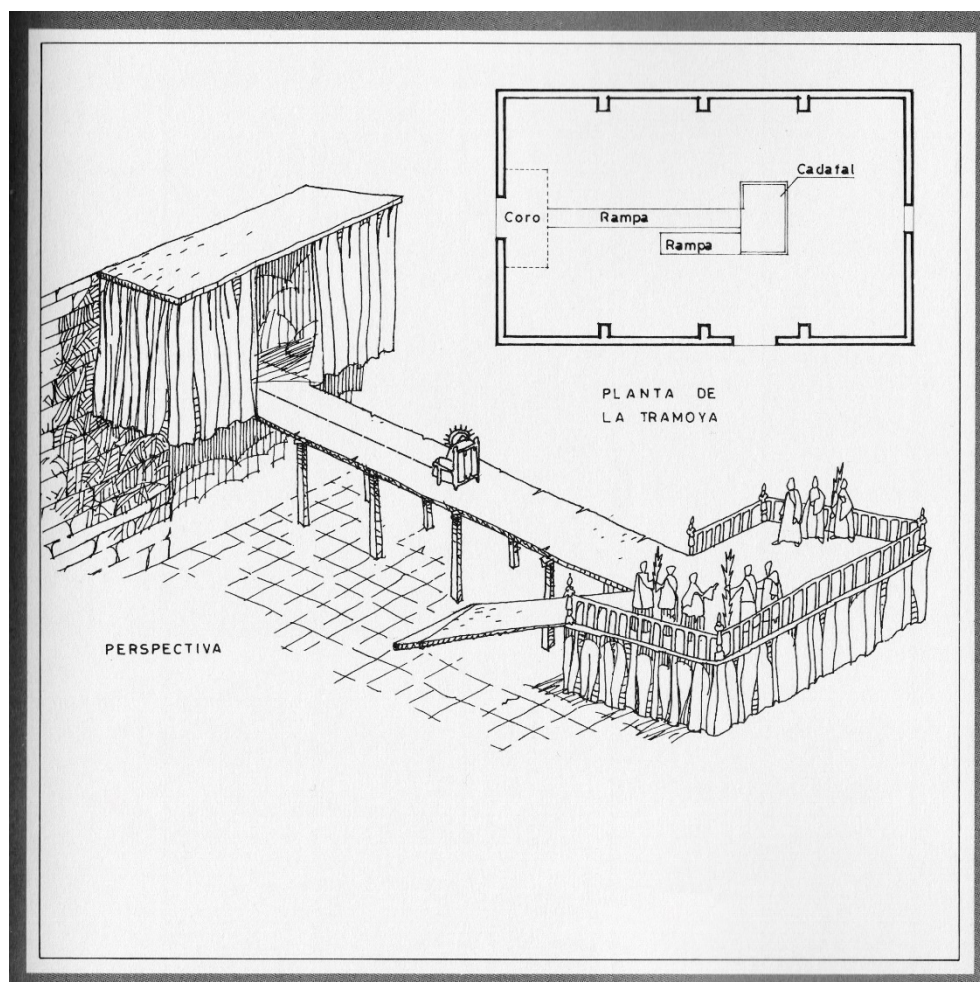


Figura II.1.20. Hipótesis de la representación del Misteri en la iglesia del siglo XIV (Martínez y Martínez, 1990).

De esta forma estarían separados los dos planos escenográficos de la acción: la plataforma-tierra y el coro-cielo, ya que, la solución de cubierta inclinada de teja propia de las iglesias de la reconquista no permitiría que los aparatos descendieran desde ella (Martínez y Martínez, 1990). La figura II.1.20 muestra dicha hipótesis de cómo podría haberse representado el Misteri en esta iglesia.

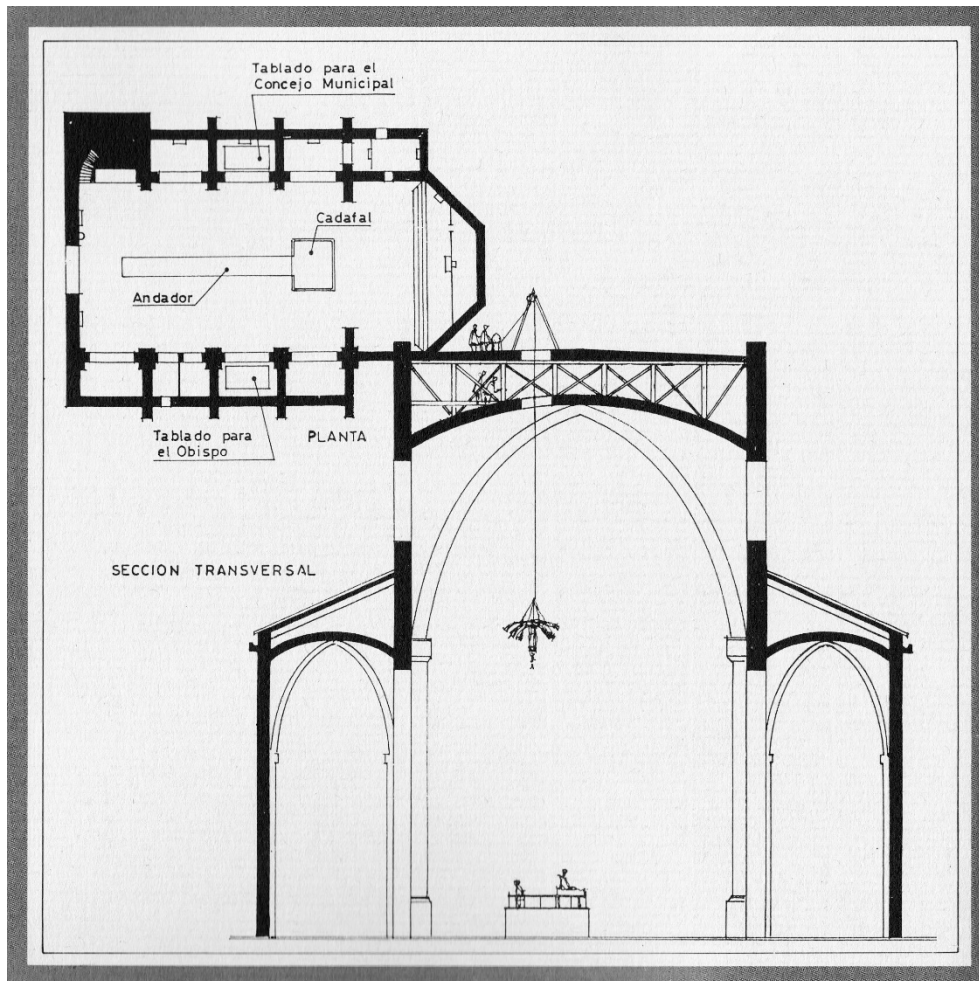


Figura II.1.21. Hipótesis de la representación del Misteri en la iglesia del siglo XVI (Martínez y Martínez, 1990).

En el caso de la iglesia anterior a la actual la documentación existente aporta datos claros sobre cómo se llevaba a cabo la representación del Misteri. En la junta de julio de 1663 se acuerda “veure lo que convé fer en lo arch que està prop de la trapa pera on baixa l'àngel...” (Pomares, 2004). Esto demuestra la existencia de la tramoya vertical en este templo. José Pomares se atreve a describir cómo funcionaría esta trapa, de la que dice que quedaría disimulada por un a pu erta c orrediza o s obrepuesta durante el año, abriéndose y cubriéndose c on un l ienzo pi ntado p ara la r epresentación, y que es taría situada entre la segunda arcada y la tercera.

La figura II.1.21 muestra un dibujo realizado por los hermanos Martínez de cómo podría haberse llevado a cabo la representación en esta iglesia.

Por otra parte, en un legajo conservado en el archivo de Santa María se hace referencia a un pago realizado en 1580 “per adobar la navada de la trapa y lo demás” (Martínez y Martínez, 1990), de donde estos autores deducen que cada año se cerraría con adobes el agujero de la trapa y se instalaría la plataforma en la que se colocaban los aparatos elevadores. Concluyen que tanto el agujero de la puerta del cielo como el del tejado serían originalmente de pequeñas dimensiones porque ni la cubierta ni la bóveda lo permitirían de otra forma y que, por tanto, los aparatos que pasaran a través de ellos serían pequeños y sostendrían como mucho a una persona, complicándose y siendo necesario ampliar los agujeros con el paso del tiempo, lo que pudo contribuir a los problemas estructurales y de goteras de la iglesia.

II.1.4.2. El templo actual

La relación entre el actual templo de Santa María y la Festa o Misteri d'Elx ha sido estudiada por varios autores. Dado que la representación teatral se venía desarrollando desde antes de la construcción de la actual iglesia es de suponer que constituyó una de las premisas de Francisco Verde al realizar el proyecto.

Juan Sempere (1993) analiza esta cuestión en su tesis doctoral titulada “La fiesta como tema y condición en Santa María de Elche” en la que el autor establece hasta qué punto el uso del templo para la representación condicionó su diseño.

Tras describir los elementos básicos tanto de la Festa como del Templo, Sempere determina que los problemas de los templos anteriores probablemente influyeron en el arquitecto Francisco Verde a la hora de proyectar el actual, llevándolo a buscar un punto medio entre la prudencia y las exigencias de el Misteri. Concluye que Santa María se atiene a los requerimientos necesarios para realizar la representación en la forma tradicional, como se hacía en 1673:

“Una nave larga para el “Andador”, espaciosa para el “Cadafal” y con hermosas tribunas para el público; una nave alta para la representación aérea bien iluminada, ventilada fácilmente accesible con un terrado plano para manejar los aparatos.” (Sempere, 1993, p.144)

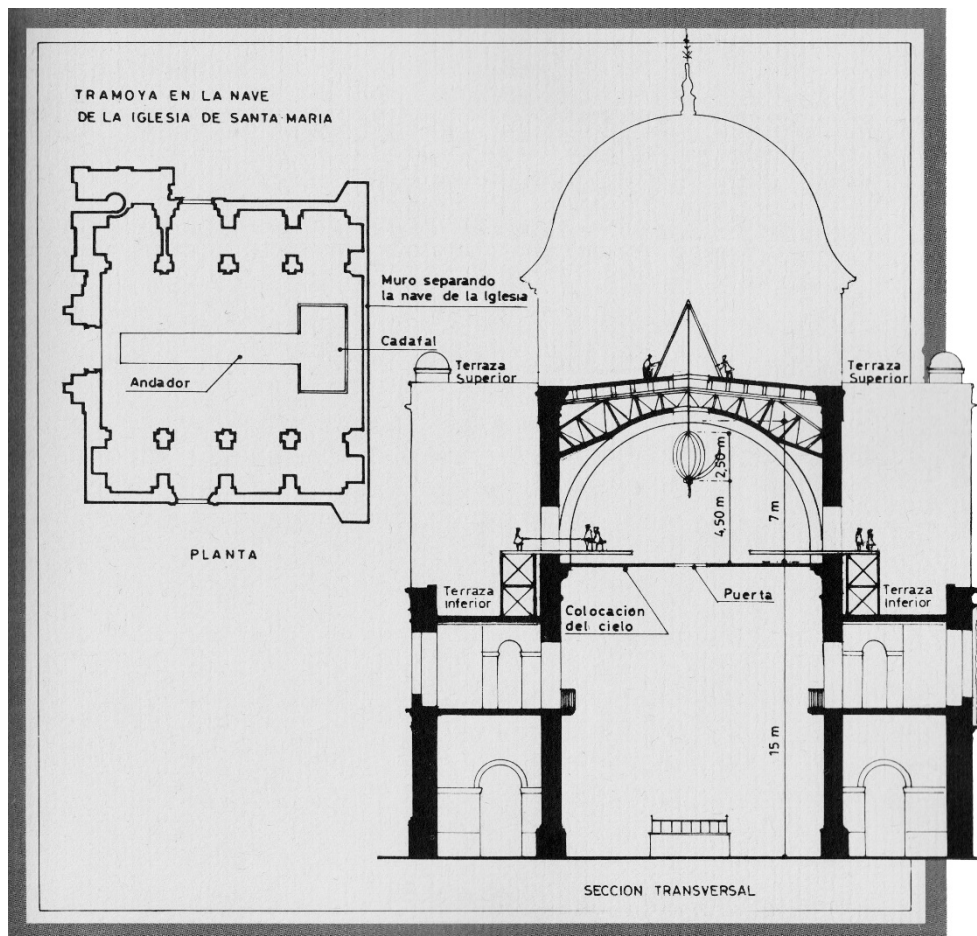


Figura II.1.22. Esquema del sistema de tramoyas para la representación del Misteri en la nave de la iglesia actual (Martínez y Martínez, 1990).

La representación tradicional de la que habla tenía lugar en la nave, con la tramoya en la arcada y en el terrado, como puede verse en el dibujo de los hermanos Martínez que se muestra en la figura II.1.22.

En 1686 se abrió al culto la nave y se volvió a representar la Festa en Santa María. Desde entonces, no se han producido apenas cambios en la representación a excepción del traslado de la tramoya a la cúpula en 1761. El traslado al crucero sólo ha influido en Santa María en pequeños detalles.

Basándose en esto atribuye a la esbeltez del templo, los huecos, la solución adintelada de las tribunas y el peso del terrado plano, todos ellos consecuencia de dicha adecuación, los problemas estructurales acaecidos en el edificio desde 1733 hasta la restauración definitiva llevada a cabo en los años 40 y cuyo proyecto incluyó no sólo el edificio sino la escena del Misteri, tal y como muestra la figura II.1.23, demostrando una vez más la estrecha relación entre la Basílica de Santa María y la representación del Misteri.

La influencia de un elemento sobre el otro es recíproca ya que el traslado al crucero del cadafal ocasionó por un lado el alargamiento del andador con la consiguiente pérdida de densidad en algunas fases, problemas de visibilidad en determinadas escenas y de accesibilidad al colocar la tramoya en la cúpula, pero también incrementó la intensidad dramática que resulta fundamental en la representación (Sempere, 1993).

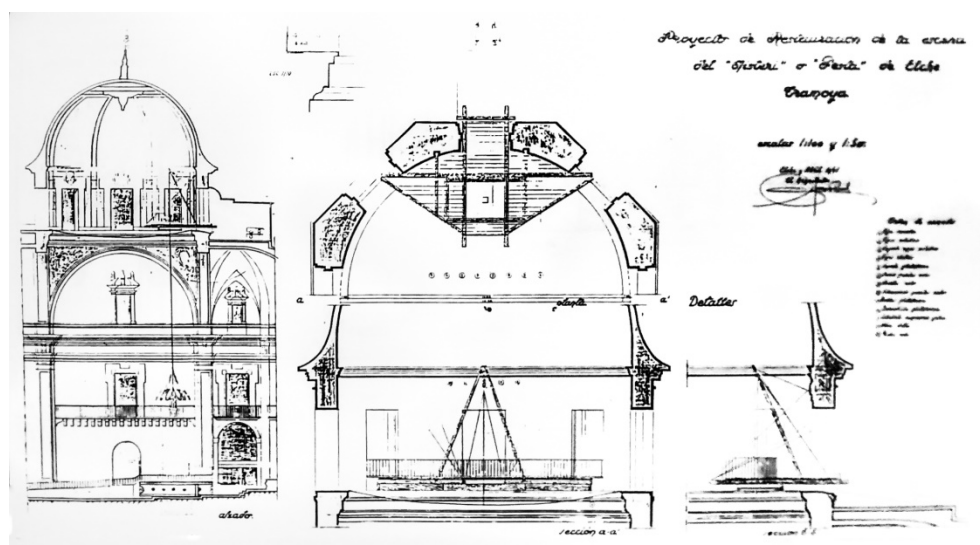


Figura II.1.23. Proyecto de restauración de la escena del Misteri de Antonio Serrano en 1940 (Sempere, 1993).

II.2.

**Acústica virtual en
recintos de culto**

II.2.1. La acústica en recintos de culto

Las iglesias que se diseñan en la actualidad toman como premisas clave la búsqueda de una apropiada distribución sonora, determinada por el acabado, la forma y la colocación de las diferentes superficies que configuran el espacio; una sonoridad adecuada del orador, músicos y otras fuentes sonoras deseadas; la obtención de un tiempo de reverberación adecuado; y por último la minimización del ruido de fondo con un buen aislamiento acústico de la envolvente y el control de las fuentes de ruido interiores y exteriores (Bradley et al., 2016), pero no siempre ha sido así.

A lo largo de la historia, la naturaleza, estructura y la geometría de los nuevos espacios han venido determinados por la tecnología y las necesidades sociales del momento. Una vez construido el edificio, los oyentes se adaptan a él y a sus condiciones, visuales y sonoras. Lo mismo ocurre con las actividades culturales, sociales y económicas y los significados simbólicos que se le otorgan. Los usuarios se acostumbran a ese espacio y cualquier cambio es percibido como una disminución de la calidad acústica (Blesser y Salter, 2011).

La basílica de la antigua Grecia se encontraba al aire libre. Posteriormente, se construyeron muros perimetrales para aislar a la audiencia del ruido exterior, las inclemencias meteorológicas o las distracciones sociales. La evolución tecnológica permitió sustituir la madera por piedra como material constructivo, ampliando los espacios y eliminando el problema de los incendios. Por otra parte, la expansión del cristianismo llevó a la necesidad de construir espacios para grandes audiencias y que mostraran el poder de sus promotores.

El patrimonio cultural religioso es importante por sus valores históricos y sociales, además de ser la máxima representación arquitectónica de la religiosidad cristiana. La poderosa influencia de la religión sobre la sociedad de muchos países se vio reflejada en la generación de un importante legado patrimonial, dentro del cual se encuentran algunos de los mejores edificios que esas sociedades fueron capaces de producir, y entre los edificios religiosos, el templo, es el máximo exponente dando lugar a espacios que revisten la mayor riqueza y complejidad de entre todos ellos.

Los grandes espacios abovedados de piedra y sus singulares condiciones acústicas serían, por tanto, consecuencia de las necesidades funcionales y simbólicas, y de la evolución de las técnicas constructivas y no un objetivo en sí mismos.

No obstante, la experiencia sonora debida a la alta reverberación que tenía lugar en los grandes recintos de culto adquirió un significado simbólico incorporándose como un medio más para alcanzar las metas sociales y políticas que se perseguían. Por ello, se introdujeron cambios en la liturgia para adaptarse a estos espacios (Blesser y Salter, 2011).

Del mismo modo, la arquitectura influye en la composición e interpretación de las piezas musicales, siendo una parte importante en el resultado sonoro de la obra. Los maestros de capilla y compositores sacros, consciente o inconscientemente, han tenido en cuenta las condiciones acústicas de los espacios en los que se iba a interpretar su música (Romero y de la Calle, 2009).

En el caso de las iglesias, se trata de espacios acústicamente complejos desde el punto de vista geométrico, debido a sus dimensiones y formas, paredes curvas, capillas laterales, bóvedas y cúpulas que a menudo actúan como volúmenes parcialmente acoplados. Por otra parte, presentan una dificultad añadida dada su versatilidad de uso.

En época medieval, la mayoría de las representaciones teatrales estaban vinculadas a la religión, a través de todo tipo de celebraciones sacras como pasiones, procesiones, misterios, etc. La Iglesia utilizaba las representaciones teatrales como herramienta ideológica para atraer al pueblo y hacerles más comprensivos los dogmas de fe. De esta forma los recintos eclesiales y los atrios que los preceden constituyeron el marco arquitectónico de estas representaciones convirtiéndose en auténticos espacios escénicos (Barba, 2016).

Hasta el siglo XVII que los teatros y salas de conciertos comenzaron a expandirse por toda Europa, las iglesias habían sido los únicos espacios donde la música culta se producía e interpretaba (Cirillo y Martellotta, 2006)

Por otra parte, el Concilio Vaticano Segundo supuso la reforma de la liturgia y el cambio de los requerimientos acústicos. Se introdujo la lengua común en lugar del latín y se fomentó la participación de los fieles en los cantos. El nuevo papel de la palabra implicó la necesidad de una buena inteligibilidad del habla en estos espacios (Cirillo y Martellotta, 2006).

En los espacios de culto se dan tanto usos relacionados con el habla como con la música, por lo que ha de encontrarse un equilibrio entre los requerimientos de uno y otro. Como se ha visto, tradicionalmente en un mismo espacio eclesial se han dado tanto celebraciones multitudinarias como con poca afluencia de público, conciertos de órgano, de coro, representaciones teatrales religiosas, etc. Esta complejidad se ha visto incrementada recientemente con la desacralización de muchos de estos espacios y su reutilización para fines totalmente diferentes.

Los recintos de culto son, por tanto, espacios de reunión en los que la acústica debe ser adecuada para la inteligibilidad de la palabra, pero también apropiada para la música. Por este motivo es importante conocer el comportamiento acústico de estos espacios en ambos casos y las diferencias que se producen en función de la actividad que se está realizando

En este sentido, las maquetas digitales han demostrado ser un instrumento muy eficaz para el estudio del comportamiento de los edificios frente a diferentes aspectos de toda índole: constructivos, estructurales, térmicos, acústicos... También, empleando modelos virtuales se pueden recrear las experiencias sensoriales que transmiten esos espacios.

II.2.2. Aplicación de la acústica virtual a recintos de culto

A pesar de que la problemática del sonido en los recintos de culto ha existido siempre, la aplicación de la acústica virtual a este tipo de espacios es relativamente reciente.

El concepto de acústica virtual nace a raíz de la conjunción de una serie de técnicas de procesamiento de señal acústica e informáticas que permiten la visualización y audición de cualquier tipo de recinto simulado en un entorno virtual. Este concepto está íntimamente ligado al de auralización que, según Mendel Kleiner (1993) “es el proceso de presentación audible, por modelado físico o matemático, del campo sonoro de una fuente en el espacio, de manera que se puede modelar la experiencia de escucha binaural en una posición dada en el espacio modelado”. Sobre esta base conceptual y sus implicaciones técnicas, podemos construir entornos que se aproximan a la realidad medida mediante técnicas estandarizadas (Segura et al, 2013).

En el estudio acústico de salas se ha partido del análisis de salas de conciertos (Beranek, 1996; Ando, 1998; Beranek, 2004) y la normativa existente se ha elaborado para este tipo de espacios (ISO 3382-1, 2009)

Los primeros estudios llevados a cabo en catedrales se realizaron en los años 70, centrándose en los problemas de inteligibilidad de estos espacios y los espacios acoplados. Entre ellos, Alonso (2014) destaca el de Shankland and Shankland (1910) sobre el tiempo de reverberación en la basílica romana o los de Parkin y Taylor (1952a, 1952b) que analizan los problemas de inteligibilidad existentes en la catedral de San Pablo de Londres.

Desde entonces ha aumentado considerablemente la investigación dirigida al conocimiento del comportamiento acústico en recintos de culto. Para ello, la comunidad científica ha partido de la normativa, métodos, protocolos, parámetros, índices, datos, etc. obtenidos a partir del estudio de salas de conciertos, por ser estas las únicas herramientas existentes.

Las diferencias entre las salas de conciertos y los recintos de culto son notables por lo que la adaptación de la forma de trabajo y la elaboración de protocolos de calidad propios resulta necesaria e indispensable. La investigación bibliográfica ha permitido establecer una serie de aspectos a tener en cuenta a la hora de aplicar la acústica virtual en recintos de culto históricos.

Los recintos de culto se encuentran una gran cantidad de elementos singulares y propios de estos espacios, que no existen en las salas de conciertos y que, por tanto, requieren de estudios específicos para caracterizarlos y poder incluirlos en la simulación.

II.2.2.1. Características arquitectónicas

La evolución de la forma arquitectónica con el tiempo ha respondido a cuestiones estilísticas más que a adaptaciones a la liturgia, no obstante, los cambios formales han tenido una influencia en la acústica de los templos. Así, la música ha estado siempre íntimamente ligada a las transformaciones arquitectónicas. Los maestros de capilla y cantores tenían en cuenta las características acústicas del espacio, tales como la reverberación, y se adaptaban a ellas a la hora de componer e interpretar. Por el contrario, la palabra ha tenido y tiene una inteligibilidad muy deficiente debida a la gran cantidad de superficies reflectantes existentes en estos espacios y a las altas reverberaciones (De Barrio, 2008).

Una de las características que diferencian a los recintos de culto históricos de las salas de conciertos o teatros es su complejidad geométrica. La búsqueda de una relación entre la forma arquitectónica y el comportamiento acústico es recurrente (Carvalho, 1994; Galindo, 2003; Berardi, 2011). Los estudios vinculados a tipologías concretas, que analizan varios casos de iglesias con características similares han permitido extraer conclusiones y relaciones entre el comportamiento acústico y las propiedades arquitectónicas como la geometría, la longitud, la anchura o el volumen.

No obstante, la singularidad de estos espacios puede producir efectos inesperados. Aunque a priori pueda parecer lógico que el aumento del volumen se traduce en una disminución de la inteligibilidad, en determinados casos pueden producirse fenómenos debidos a la geometría de las salas que la favorezcan, siendo el caso más significativo el de San Pedro del Vaticano en el que el acoplamiento acústico entre la nave y las capillas laterales proporciona un tiempo de reverberación adecuado (De Barrio, 2008).

La representación de la complejidad espacial de estos edificios ha sido también un asunto estudiado y que tiene una importancia considerable a la hora de construir los modelos virtuales y optimizar los tiempos de cálculo en la simulación. Los trabajos realizados (Siltanen, 2008; Martellotta, 2009) defienden la necesidad de simplificar los modelos y la obtención de buenos resultados con la simplificación. Se considera que no es necesario modelar todos los elementos con detalle, sino que, por el contrario, se pueden conseguir los mismos resultados mediante la asignación de coeficientes de difusión adecuados.

Queda demostrado que la complejidad espacial de las iglesias históricas hace que sea necesaria una evaluación específica para cada uno de los edificios. Por

otra parte, se ha verificado también la necesidad de realizar un análisis por separado de las diferentes zonas o subespacios que componen los edificios (Pedrero et al., 2014; Suárez et al., 2014), dado que éstos presentan características geométricas y espaciales diferentes y es muy probable que no se comporten de igual manera desde un punto de vista sonoro, por lo que los valores medios de sala en este tipo de espacios no resultan representativos.

II.2.2.2. Materiales

Los materiales son otro elemento diferenciador entre recintos de culto y salas de conciertos. Mientras que los teatros y auditorios suelen contar con materiales absorbentes que buscan un comportamiento acústico óptimo, los materiales existentes en las iglesias suelen ser piedras y mármoles con bajos coeficientes de absorción.

Los catálogos que incluyen características acústicas recogen materiales propios de la construcción actual y no de los edificios históricos. Algunas fuentes de información para la obtención de materiales usados comúnmente en iglesias son los libros de Meyer (2003), y Cirillo y Martellotta (2006). De éstos se pueden extraer datos como que el mármol no absorbe más del 2 % de la energía, casi independientemente de la frecuencia; que la absorción de la piedra depende de su acabado, pero suele absorber entre un 4 y un 8% de la energía; y que la escayola utilizada comúnmente en decoración absorbe hasta un 8%.

Materiales textiles como alfombras o terciopelos pesados, también habituales en estos espacios, son más fáciles de encontrar en las bases de datos de materiales existentes, habiéndose realizado algunos trabajos específicos al respecto (Alonso y Martellotta, 2015) incluyendo también las pinturas como elementos absorbentes (Martellotta y Castiglione, 2011).

Por otra parte, cabe destacar, las investigaciones en torno a la absorción de los bancos en iglesias (Martellotta y Cirillo, 2009; Martellotta et al., 2011; Carvalho y Pino, 2012). Este tipo de mobiliario difiere completamente de las butacas de teatros y salas de conciertos, siendo necesario un análisis específico que ha permitido establecer absorciones entre un 10 y un 20% para los bancos vacíos que ascienden hasta un 20-30% a frecuencias bajas y alcanzan un 80% a altas cuando se encuentran ocupados por el público asistente a las celebraciones.

II.2.2.3. Posición de la fuente

La versatilidad de uso de los recintos de culto no sólo influye en el tipo de fuente sonora sino también en su posición. Las iglesias cuentan con varias posiciones de fuente establecidas, siendo el altar, el púlpito, el órgano y el coro las más habituales, y pudiendo existir otras, como ocurre en Santa María con la representación del Misteri.

Por este motivo, uno de los elementos que se tienen en cuenta en estudios recientes es la influencia de la posición de la fuente en el comportamiento acústico. Así lo hacen Berardi y Martellotta (2014), que analizan cinco posibles ubicaciones del órgano en tres iglesias rectangulares con diferentes ratios entre longitud y anchura. La forma rectangular previene de diferencias significativas entre las posiciones de fuente, pero existen variaciones, que se analizan también para diferentes volúmenes. Los autores concluyen que debe tenerse en cuenta la direccionalidad de la fuente y que los estudios deberían orientarse a los efectos creados por varias fuentes simultáneas y por los sistemas de amplificación empleados.

II.2.2.4. Evaluación de la calidad acústica en recintos de culto

La evaluación de la calidad acústica resulta un factor fundamental a la hora de determinar la necesidad de intervenir en un espacio y la idoneidad del mismo para el uso al que está destinado. Por ello, y como ya se ha comentado anteriormente, diversos estudios han establecido índices y rangos óptimos para los distintos parámetros medibles, no obstante, a la igual que ocurre con la normativa vigente, se han centrado en salas de conciertos, cuyas características y requerimientos nada tienen que ver con los de los recintos de culto.

Las pruebas subjetivas en este tipo de espacios son escasas debido a la dificultad de llevarlas a cabo, no obstante, se han realizado algunos avances en el sentido de adaptar la evaluación de la calidad a recintos de culto.

Algunos autores han establecido índices globales de evaluación adaptados a iglesias (Engel y Kosala, 2007; Kosala, 2011), aunque su uso no se ha extendido. Por otra parte, y como ya se ha comentado, la diversidad de usos en estos espacios, en lo que se lleva a cabo la audición tanto de la música como de la palabra, supone una dificultad añadida, ya que al combinar todos los parámetros en una iglesia con unas condiciones óptimas para la música, pero negativas para el habla podría obtener el mismo índice que en caso de ocurrir lo contrario. En Berardi (2012) se busca establecer un índice para evaluar la acústica en iglesias, tratando de superar la dificultad anterior. Para ello, el autor considera cinco características: reverberación, calidad sonora, espacialidad, fuerza sonora y claridad; definidas por siete parámetros, comparando los valores de estos parámetros con los obtenidos en estudios de preferencia acústica y estableciendo dos índices, uno para el habla y otro para la música. Los requerimientos para la correcta audición del habla y la música son diferentes y deben ser evaluados por separado. En esta línea y basándose en el trabajo de Berardi, Girón et al. (2015) y Álvarez-Morales et al. (2016), presentan un modelo para sintetizar la acústica de los grandes espacios de culto para los dos tipos de estímulos sonoros.

Por último cabe destacar el estudio llevado a cabo por Martellotta (2008), que le permitió establecer que la percepción subjetiva se correlaciona bien con el parámetro EDT, estableciendo valores óptimos para el caso de música de órgano dependiendo del volumen de la sala.

II.3.

**Parámetros
acústicos de calidad
de salas**

II.3.1. Clasificación de los parámetros

La calidad acústica de una sala puede evaluarse de forma integral mediante una serie de parámetros. En la presente tesis se han seleccionado algunos de ellos con el fin de caracterizar acústicamente la Basílica de Santa María y evaluar la calidad de la simulación.

Siguiendo investigaciones previas (Giménez, 1987; Cerdá, 2009) se han clasificado los parámetros estudiados en cuatro grupos:

- Parámetros de reverberación: tiempo de reverberación (RT) y tiempo de caída inicial (EDT).
- Parámetros de energía: claridad del habla (C50), claridad musical (C80), tiempo central (Ts) y fuerza sonora (G),
- Parámetros de inteligibilidad: índice de transmisión de la palabra (STI).
- Parámetros de espacialidad: índice de correlación cruzada interaural (IACC) e índice de fracción de energía lateral (LF).

Estos parámetros están asociados con las principales cualidades subjetivas de las salas.

La reverberación es la persistencia del sonido en la sala una vez cesada la emisión. Representa el grado de vivacidad de la sala y debe adecuarse al uso del recinto ya que no tiene los mismos requerimientos una representación teatral o un discurso verbal que los distintos tipos de música.

Los parámetros energéticos son determinantes para el estudio de la transparencia, relacionada con la intensidad relativa del sonido. La transparencia en relación con la audición musical, se refiere a la percepción de tonos separados en el tiempo de instrumentos que están siendo tocados simultáneamente. Es una propiedad importante en la que influyen de manera importante las primeras reflexiones, reflexiones en las que la trayectoria entre fuente y receptor es corta. Los parámetros energéticos son muy sensibles a los cambios de posición en la sala, de tal modo que pueden experimentar grandes variaciones con la posición del receptor.

La inteligibilidad es un parámetro esencial para la audición de la palabra y cuantifica la comprensión verbal.

Por último, la sensación espacial cuantifica la percepción de sentirse envuelto por el sonido, dando la impresión de encontrarse en un espacio pequeño y estar cerca de la fuente sonora. Esta cualidad se potencia con la llegada adecuada de reflexiones laterales.

II.3.2. Parámetros de reverberación

II.3.2.1. Tiempo de reverberación (RT)

El cálculo temporal de la respuesta sonora en un recinto determina la reverberación, que está muy relacionada con las reflexiones de sonido en las superficies que configuran la sala. Se cuantifica mediante el parámetro “tiempo de reverberación” (reverberation time, RT) establecido como el tiempo en segundos que transcurre desde que cesa la emisión sonora hasta que el nivel de presión sonora en el recinto disminuye 60 decibelios (Sabine, 1900).

El tiempo de reverberación ha sido y es el parámetro más conocido y comúnmente utilizado para calificar el comportamiento acústico de las salas. Para su cálculo se han establecido numerosas expresiones.

II.3.2.1.1. Ecuación de Sabine

$$T_R = \frac{0,161V}{A+4mV}$$

donde V es el volumen del recinto (m^3), A su absorción sonora (m^2 o sabinios métricos) y m es la constante de atenuación del sonido en el aire (m^{-1}) (Sabine, 1922).

Para determinar m existen diferentes métodos, unos complejos definidos por normas internacionales y otros con expresiones aproximadas (Galindo, 2003).

II.3.2.1.2. Ecuación de Eyring-Norris

En recintos ruidosos, la ecuación de Sabine a partir de valores del tiempo de reverberación superiores a los medidos, por ello Eyring propone la siguiente expresión alternativa para el cálculo:

$$T_R = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}) + 4mV}$$

donde $\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción medio ponderado de un recinto, obtenido como:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S}$$

donde S_i es el área de la superficie i -ésima (m^2) y α_i su coeficiente de absorción (Eyring, 1930).

II.3.2.1.3. Ecuación de Millington y Sette

Propuesta con el fin de incorporar las peculiaridades de cada uno de los materiales sin perder las ventajas de la ecuación anterior para salas sordas, tiene la forma:

$$T_R = \frac{0,161V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV}$$

Donde, de nuevo, S_i es el área de la superficie i -ésima (m^2) y α_i su coeficiente de absorción (Millington, 1932).

II.3.2.1.4. Ecuación de Kuttruff

Teniendo en cuenta la probabilidad de que en un intervalo temporal t ocurran N reflexiones, Kuttruff propone la siguiente expresión para el tiempo de reverberación (Kuttruff, 1976; Kuttruff, 1979):

$$T_R = \frac{0,161V}{aS + 4mV}$$

donde

$$a = \ln\left(\frac{1}{1 - \bar{\alpha}}\right) + \ln\left(1 + \frac{\sum_i S_i^2 (1 - \alpha_i)(\bar{\alpha} - \alpha_i)}{S^2 (1 - \bar{\alpha})^2 - \sum_i S_i^2 (1 - \alpha_i)^2}\right)$$

II.3.2.1.5. Ecuación de Fitzroy

Para corregir los errores respecto de los valores experimentales cuando se utilizan las fórmulas clásicas en salas cuya absorción no está uniformemente repartida, Fitzroy propuso la siguiente fórmula:

$$T_R = \left(\frac{S_x}{S}\right) \left[\frac{0,161V}{-S_x \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right] + \left(\frac{S_y}{S}\right) \left[\frac{0,161V}{-S_y \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right] + \left(\frac{S_z}{S}\right) \left[\frac{0,161V}{-S_z \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]$$

donde S_x , S_y y S_z es el área de los cerramientos perpendiculares, respectivamente a los ejes OX, OY y OZ (Fitzroy, 1959) y los coeficientes respectivos se calculan como media aritmética ponderada de los de cada uno de ellos y vienen dados por:

$$\bar{\alpha}_x = \frac{S_{x1}\bar{\alpha}_{x1} + S_{x2}\bar{\alpha}_{x2}}{S_x}; \quad \bar{\alpha}_y = \frac{S_{y1}\bar{\alpha}_{y1} + S_{y2}\bar{\alpha}_{y2}}{S_y}; \quad \bar{\alpha}_z = \frac{S_{z1}\bar{\alpha}_{z1} + S_{z2}\bar{\alpha}_{z2}}{S_z}$$

Por tanto, el tiempo de reverberación de local corresponde con la media aritmética ponderada del correspondiente a cada una de las direcciones del espacio.

II.3.2.1.6. Ecuación de Arau

Al tratar de justificar teóricamente la expresión empírica de Fitzroy, Arau observa una triple pendiente en las curvas de extinción registradas en salas con una distribución de la absorción no uniforme, lo que le lleva a proponer una ecuación alternativa en la que sustituye la media aritmética por una media geométrica ponderada:

$$T_R = \left[\frac{0,161V}{-S_x \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{\left(\frac{S_x}{S}\right)} \left[\frac{0,161V}{-S_y \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{\left(\frac{S_y}{S}\right)} \left[\frac{0,161V}{-S_z \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{\left(\frac{S_z}{S}\right)}$$

donde S_x , S_y y S_z es el área de los cerramientos perpendiculares, respectivamente a los ejes OX, OY y OZ (Arau, 1988).

II.3.2.1.7. Tiempos de reverberación óptimos

El proceso de extinción del sonido en la sala depende fundamentalmente de la geometría del espacio y de las propiedades acústicas, fundamentalmente de absorción, de los materiales que lo componen. Puesto que éstas últimas varían con la frecuencia, los tiempos de reverberación variarán en función de la misma, siendo uno de los valores más significativos a la hora de caracterizar acústicamente un espacio el denominado "tiempo de reverberación medio" obtenido como el promedio de los valores de RT a 500 y 1000 Hz. Un recinto

con un RT_{mid} grande se denomina “vivo”, mientras que si su valor es pequeño recibe el calificativo de “apagado” o “sordo”. El valor más adecuado de RT_{mid} depende del volumen del recinto y de la actividad que se vaya a desarrollar en él (Barba, 2016).

Los espacios destinados a usos relacionados con la palabra como obras teatrales, conferencias etc, requieren tiempos de reverberación bajos para conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables valores mayores. El tiempo de reverberación óptimo según el uso varía de unos investigadores a otros, pero en todos los casos se considera que debe aumentar ligeramente con el volumen.

Los valores óptimos se basan en datos de apreciación, opinión y gusto de los oyentes recogidos a través de estudios experimentales con cámaras acústicas artificiales de características controladas y otros realizados en recintos reales mediante encuestas de valoración.

Con ellos, diversos autores han elaborado ábacos y ecuaciones empíricas que determinan el tiempo de reverberación óptimo en función del volumen del local y del uso del mismo, normalmente haciendo referencia al tiempo de reverberación medio o incluso exclusivamente a la banda de 500 Hz.

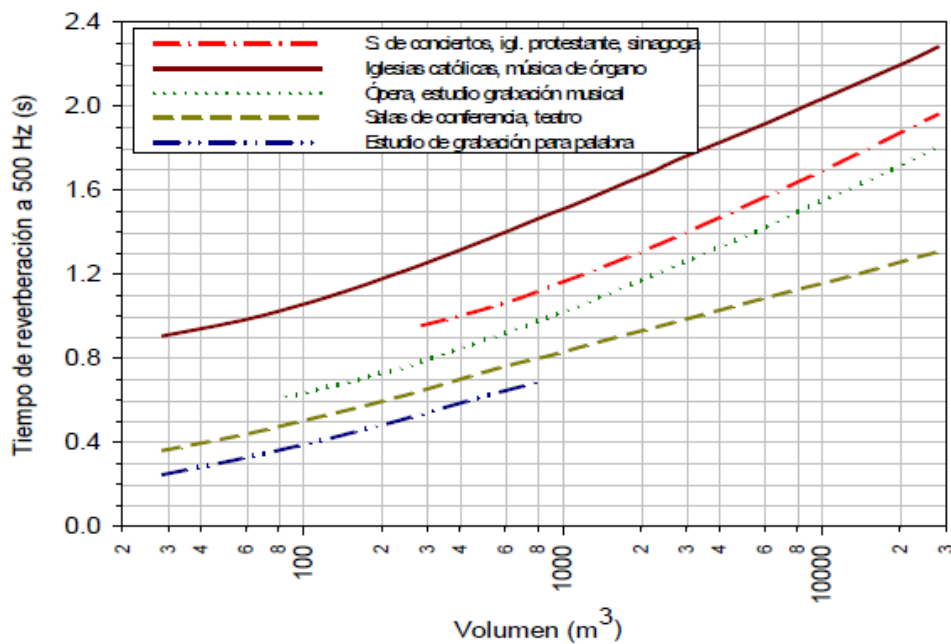


Figura II.3.1. Tiempos de reverberación óptimos (500 Hz) propuestos por Beranek (1993).

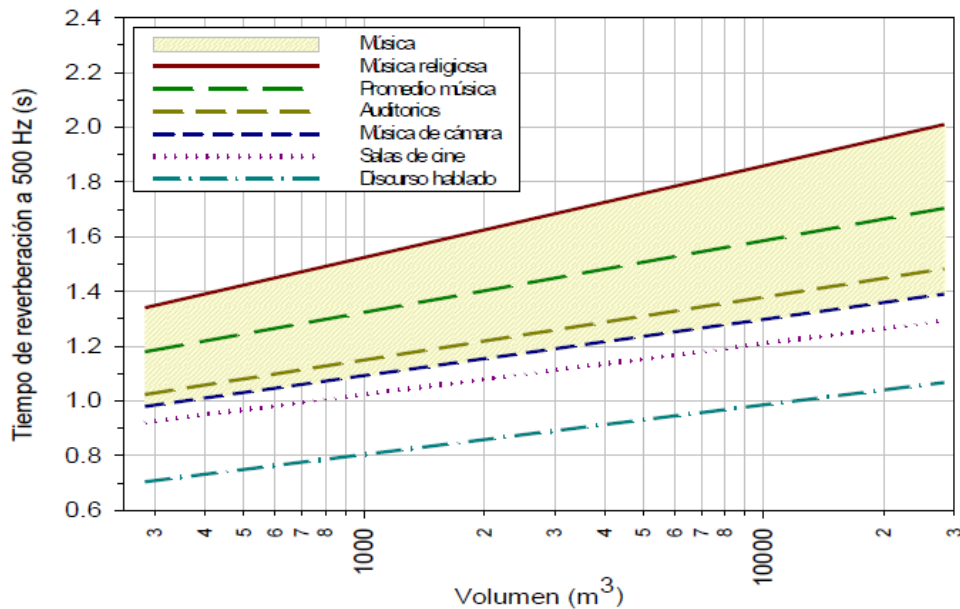


Figura II.3.2. Tiempos de reverberación óptimos (500 Hz) propuestos por Knudsen y Harris (1988).

II.3.2.2. Tiempo de caída inicial (EDT)

Está definido como el tiempo que transcurre desde que cesa la emisión de la fuente hasta el instante en que el nivel de presión sonora disminuye 60 dB, calculado según la pendiente correspondiente a los diez primeros decibelios de la caída. Se obtiene multiplicando por seis el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

Varía con la frecuencia de manera similar al tiempo de reverberación, pero el parámetro EDT es más sensible a la llegada del sonido directo y a las primeras reflexiones ya que se calcula sobre un intervalo de caída muy pequeño. Por este motivo, la variabilidad entre unas posiciones y otras del receptor es mayor que en el caso del RT, lo que conlleva una mayor relación de este parámetro con la impresión subjetiva de la reverberación en la sala (Barron, 1995).

II.3.3. Parámetros de energía

II.3.3.1. Claridad (C50 y C80)

Los parámetros de claridad cuantifican el tiempo que tarda el oyente en recibir la energía sonora, propiedad determinante en la impresión acústica subjetiva, y

están basados en el estudio de la relación entre el sonido reflejado y el sonido directo.

Su unidad de medida es el decibelio y se definen como 10 veces el logaritmo del cociente entre la energía sonora que llega al receptor en los primeros “t” milisegundos y la energía total recibida a partir de los “t” milisegundos (Abdel, 1973).

$$C_t = 10 \log \frac{\text{Energía hasta } t \text{ ms}}{\text{Energía a partir de } t \text{ ms}} (dB)$$

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} (dB)$$

siendo:

$p(t)$ = presión sonora instantánea

t = límite temporal que separa la energía inicial de la final

Se considera que la energía sonora recibida en los tiempos iniciales es útil para la inteligibilidad de los mensajes tanto musicales como hablados, mientras que la energía posterior distorsiona o confunde. Los valores de C_t elevados indican que la energía sonora inmediata es superior a la tardía y por tanto la señal sonora será muy clara.

La claridad para la palabra (C_{50}) es el valor de C_t particularizado para un tiempo de 50 milisegundos. Se determina, por tanto, a partir de la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 milisegundos desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 50 ms, calculada en bandas de frecuencia de octava entre 125Hz y 4kHz.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^\infty p^2(t) dt} (dB)$$

Se utiliza habitualmente el valor promedio ponderado de las frecuencias centrales mediante los coeficientes indicados en la siguiente expresión:

$$C_{50} = 0,15 \cdot C_{50}^{500Hz} + 0,25 \cdot C_{50}^{1kHz} + 0,35 \cdot C_{50}^{2kHz} + 0,25 \cdot C_{50}^{4kHz} (dB)$$

Se considera que la claridad es excelente cuando el valor es superior a 7 dB, buena cuando se encuentra entre 2 y 7 dB, aceptable cuando está entre -2 y 2 dB, pobre para valores entre -7 y -2 dB y mala cuando es inferior a -7 dB (Barba, 2016).

La claridad musical se cuantifica mediante el parámetro C80, que guarda relación con la percepción de la separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Se determina a partir de la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 milisegundos desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80 ms, calculada en bandas de frecuencia de octava entre 125Hz y 4kHz.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} (dB)$$

Al igual que en el caso anterior, el valor promedio de sala se obtiene de las frecuencias centrales, mediante la expresión:

$$C_{80} = \frac{1}{3} (C_{80}^{500Hz} + C_{80}^{1kHz} + C_{80}^{2kHz}) (dB)$$

Los valores recomendados dependen del tipo de música, aceptándose comúnmente valores comprendidos entre -4 y 4 dB, aunque se recomiendan márgenes más estrictos, entre -2 y 2 dB (Barba, 2016).

II.3.3.2. Tiempo central (Ts)

El tiempo central es el tiempo en milisegundos en el cual el nivel de energía integrado antes de ese momento es igual a la energía recibida después de él (ISO 3382-1,2009).

Se calcula mediante la expresión:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Es indicador de la nitidez del sonido. Un tiempo central corto va asociado a una mayor claridad mientras que si es largo supone una nitidez menor y mayor reverberación.

II.3.3.3. Fuerza sonora (G)

El parámetro fuerza sonora, G, se define como la diferencia existente entre el nivel sonoro percibido en un punto de la sala y el nivel sonoro percibido a diez metros de distancia de la misma fuente omnidireccional emisora en condiciones de campo libre, es decir, sin tomar en consideración ningún tipo de reflexiones (ISO 3382-1,2009). Se calcula mediante la expresión:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} (dB)$$

siendo:

$p_A(t)$ = presión sonora de referencia

Si G es positivo la sala refuerza con sus reflexiones el sonido emitido, si por el contrario los valores de G son negativos se considera que la sala atenúa en cierto modo el sonido. Es conveniente que los valores de G medidos en cualquier punto de la sala sean positivos, para asegurar que la geometría y la absorción de las superficies no perjudican la distribución de los niveles sonoros.

El valor promedio de sala se calcula a partir de los valores correspondientes a frecuencias medias mediante la siguiente expresión:

$$G_{mid} = \frac{1}{2} (G^{500Hz} + G^{1kHz}) (dB)$$

La principal limitación de G es su absoluta dependencia con la distancia existente entre el oyente o receptor y la fuente emisora, ya que a los valores en decibelios percibidos en la sala les restamos un valor fijo (el nivel registrado a 10 metros en campo libre), por lo que la atenuación natural del sonido con la distancia origina que la fuerza sonora G se aminore también con ésta en el interior de los recintos (Barba, 2016).

II.3.4. Parámetros de inteligibilidad

II.3.4.1. Índice de transmisión de la palabra (STI)

El índice de transmisión de la palabra (Speech Transmission Index, STI), permite cuantificar la inteligibilidad del discurso hablado con un único valor comprendido entre 0 y 1, correspondientes a inteligibilidad nula y máxima respectivamente. La obtención de STI es compleja y está relacionada con las variaciones entre los espectros de las envolventes de las señales emitida y recibida (Steeneken y Houtgast, 1980).

A partir del valor de STI es posible caracterizar cualitativamente la inteligibilidad de una sala, calificándola como mala (0-0,3), pobre (0,3-0,45), aceptable (0,45-0,6), buena (0,6-0,75) y excelente (0,75-1), mediante una clasificación establecida basada en estudios muy amplios que incluyen la medición de diferentes idiomas y ensayos subjetivos. En el centro del rango, cada calificación corresponde a un intervalo de 0,15 en la escala STI, lo cual implica que diferencias de este orden son importantes y resultan claramente perceptibles para la inteligibilidad (Barba, 2016).

II.3.5. Parámetros de espacialidad

II.3.5.1. Índice de correlación cruzada interaural (IACC)

La correlación cruzada interaural (InterAural Cross-Correlation, IACC) se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales (Schroeder et al., 1974). Cuando las dos señales son iguales, IACC toma el valor 1, mientras que si son aleatorias e independientes el valor de IACC será 0.

Al tratarse de un parámetro binaural la medida in situ de IACC se realiza mediante el registro de las señales impulsivas captadas por dos micrófonos colocados en las orejas de una cabeza artificial (dummy head). Tomando la señal en los primeros 80 milisegundos desde la llegada del sonido directo se determina el $IACC_E$ (Early), calculado promediando los valores a las frecuencias de 500Hz, 1kHz y 2kHz.

El parámetro $IACC_E$ es indicativo del grado de difusión de la sala y permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos dentro de los primeros 80 ms. Cuanto menor es este parámetro, existe mayor diferencia perceptible entre las señales registradas en ambos oídos y la sensación de espacialidad será mayor.

Tomando la señal desde los 80 milisegundos iniciales hasta 1 segundo, se determina el $IACC_L$ (Late). Este parámetro se utiliza menos, ya que las

diferencias de señal en la percepción binaural se manifiestan fundamentalmente en los milisegundos iniciales con el sonido directo y las reflexiones tempranas, y no posteriormente cuando la percepción es más homogénea debido al campo difuso.

La expresión para el cálculo de los parámetros IACC es:

$$IACC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt\right)^{1/2}} \text{ (para } |\tau| \leq 1ms \text{)}$$

siendo:

$p_L(t)$ = presión sonora instantánea que incide sobre el oído izquierdo (left)

$p_R(t)$ = presión sonora instantánea que incide sobre el oído derecho (right)

II.3.5.2. Índice de fracción de energía lateral (LF)

La eficiencia o fracción de energía lateral se cuantifica mediante el índice de fracción de energía lateral LF que se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 milisegundos tras la llegada del sonido directo (excluyendo éste) y la energía recibida procedente de todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo (Barron y Marshall, 1981). Se calcula como cociente de energías mediante la expresión:

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta 80ms}}{\text{Energía total hasta 80ms}}$$

$$LF = \frac{\int_{t_d}^{t_e} p_8^2(t)dt}{\int_0^{t_e} p^2(t)dt} = \frac{\int_{t_d}^{t_e} p^2(t)\cos\theta dt}{\int_0^{t_e} p^2(t)dt}$$

siendo:

$p_8(t)$ = presión sonora instantánea, obtenida de la respuesta impulsiva medida con un micrófono con perfil de directividad en figura de 8, que presenta una zona de recepción nula orientada hacia el emisor (poca influencia del sonido directo),

recogiendo predominantemente energía procedente de las direcciones laterales. El límite inferior de la integral es de 5 ms (t_d) tras la llegada del sonido directo, lo cual asegura su eliminación en los cálculos. El límite superior es $t_e=80$ ms, tomando por tanto en consideración únicamente el primer sonido reflejado.

$p(t)$ =presión sonora instantánea medida con micrófono omnidireccional.

θ = ángulo del sonido incidente con el eje imaginario que pasa por los oídos del oyente

El valor promedio de s_{ala} se obtiene a partir de los correspondientes a las bandas de frecuencias comprendidas entre 125 y 1000 Hz mediante la siguiente expresión:

$$LF_{E4} = \frac{1}{4} (LF^{125Hz} + LF^{250Hz} + LF^{500Hz} + LF^{1kHz})$$

El índice de fracción de energía lateral es directamente proporcional a la cualidad de espacialidad de la sala, valores altos de LF indican una percepción subjetiva de elevada espacialidad y al contrario.

Capítulo III.
**Metodología de la
investigación**

III.1. Esquema general de trabajo

Como se ha establecido en los objetivos, la investigación se ha centrado en la aplicación de la acústica virtual como herramienta arquitectónica aplicada al patrimonio: la predicción en proyectos de intervención.

La metodología de trabajo se ha ido estableciendo, completando y corrigiendo a partir de los resultados obtenidos de su aplicación en el caso concreto de la Basílica de Santa María. La figura III.1 muestra el esquema de trabajo seguido. Como se observa, se compone de tres partes: la toma de medidas, la simulación acústica y la simulación visual. El trabajo deberá completarse con la valoración subjetiva mediante encuestas, que no se ha realizado todavía por los problemas logísticos que conlleva.

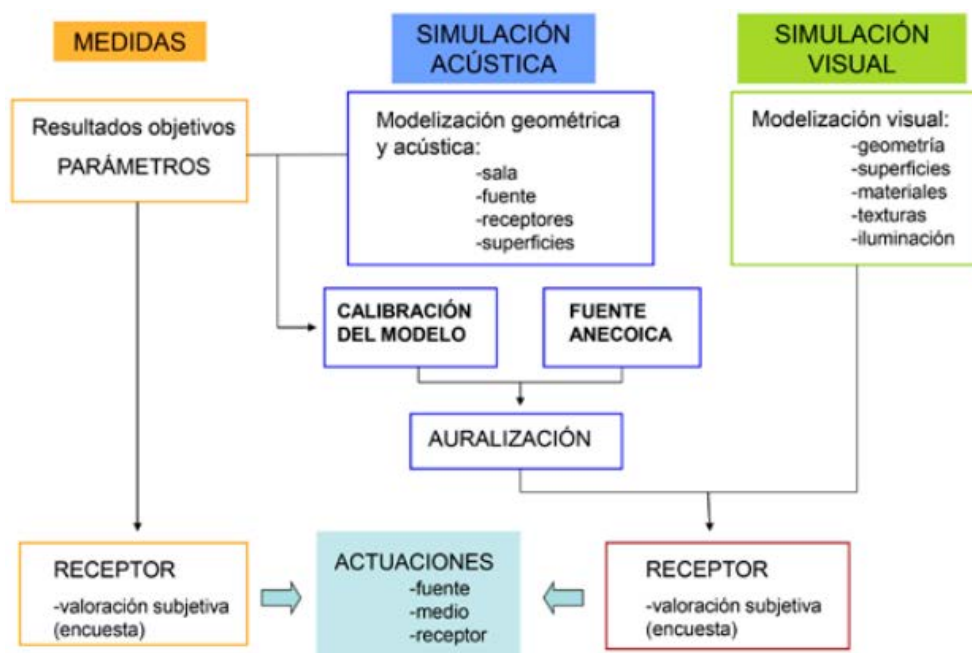


Figura III.1. Metodología de trabajo en edificios existentes

A continuación se detalla el procedimiento seguido en cada una de las etapas de trabajo.

III.2. Construcción de los modelos

El estudio acústico se realiza a partir de modelos virtuales tridimensionales del interior de las salas para lo cual se ha partido de la información planimétrica de las mismas. En el caso de la Basílica de Santa María se ha contado con una planta en AutoCAD, y dos secciones, una longitudinal y una transversal, en formato papel, que se han pasado a AutoCAD.

La casuística en cuanto a la información disponible varía en cada caso. No obstante, al tratarse de edificios históricos de los que no existe un proyecto, los planos suelen ser escasos o inexistentes, y sólo se encuentran en papel, siendo necesario realizar un levantamiento gráfico de la sala.

A pesar de contar con los planos se han comprobado las medidas principales in situ. La experiencia ha determinado que esta comprobación resulta fundamental ya que se han encontrado diferencias de hasta un metro entre los dibujos y las distancias medidas que dan lugar a variaciones importantes en el volumen de la sala y afectan a los resultados.

Una vez verificadas las dimensiones de la Basílica se ha procedido a la construcción de dos modelos tridimensionales. Las características del modelo virtual dependen de su aplicación, siendo diferentes los requisitos para la simulación visual que para la acústica, por lo que se ha comprobado que resulta más eficiente construir dos modelos diferentes (Planells et al., 2011). La tabla III.1 recoge las características generales de los diferentes modelos construidos.

Tabla III.1. Características de los modelos destinados a la simulación gráfica y acústica respectivamente.

Modelo simulación gráfica	Modelo simulación acústica
AutoCAD Construcción con caras, sólidos y superficies. Detalles. Capas por materiales y plantas. Sala completa.	AutoCAD + SketchUp Construcción con caras. Geometría simplificada. Capas por materiales y plantas. Media sala, simetría y corrección posterior.

III.2.1. Modelo para simulación acústica

Se ha construido un modelo simplificado de la Basílica empleando los software AutoCAD y SketchUp. AutoCAD es el programa de dibujo asistido por ordenador más extendido por lo que en el caso de existir planos en versión digital lo más frecuente es que se encuentren en este formato, además dispone de un mayor número de comandos que facilitan el levantamiento tridimensional de espacios geoméricamente tan complejos. El principal problema detectado a la hora de

elaborar los modelos acústicos con AutoCAD es la limitación en el número de vértices de las caras y la imposibilidad de determinar la orientación de las normales. Un mayor número de caras o la incorrecta orientación de las mismas se traducen en errores en el software acústico. SketchUp ofrece menor precisión y opciones de modelado, sin embargo admite caras con un número ilimitado de vértices y asigna diferente color a la cara en función de la orientación de la normal. Por ello, la combinación de ambos permite aprovechar al máximo las ventajas que aporta cada uno (Cervera et al., 2012) y optimizar el trabajo.

Para la construcción del modelo de la Basílica de Santa María se ha partido de la planta en AutoCAD debidamente contrastada y corregida como se ha comentado en el punto anterior. A partir de la misma y tomando como referencia las alturas de las secciones se ha levantado una estructura alámbrica situando en el espacio los principales puntos que configuran el interior de la Basílica.

El modelo alámbrico se ha exportado a SketchUp donde se han creado las superficies del modelo. Las caras se han distribuido en capas en función de los materiales, de esta forma se facilita la asignación de propiedades acústicas. Dado que la Basílica es sensiblemente simétrica y al tratarse de un modelo simplificado se ha levantado únicamente la mitad y se le ha aplicado simetría, corrigiendo diferencias puntuales como el órgano. Una vez cerrado el modelo y comprobada la correcta orientación de las superficies que lo forman se ha exportado al software de simulación CATT-Acoustics utilizando un plugin de exportación.

Para la representación del Misteri se introducen nuevos elementos en la Basílica como son el andador y cadafal en los que se realiza la representación, y las tribunas laterales para el público. Por otra parte se coloca una lona en la parte baja del tambor del crucero tapando la cúpula. Estos cambios modifican el comportamiento acústico del espacio por lo que se ha construido un segundo modelo con estas características a partir del modelo anterior.

III.2.2. Modelo para simulación gráfica

Como se ha comentado, los requerimientos para obtener una simulación gráfica lo más realista posible difieren mucho de los de la simulación acústica. Es necesario que el modelo incluya los detalles y elementos más significativos de la Basílica.

En este caso, se ha construido un modelo detallado empleando el software AutoCAD que posteriormente se ha exportado a 3dsMax para aplicarle texturas e iluminación. Las limitaciones que presenta AutoCAD al modelar con caras 3d desaparecen en este caso ya que 3dsMax reconoce tanto caras como sólidos y superficies, lo que facilita considerablemente la elaboración del modelo al poder combinar distintos tipos de objetos en función de las necesidades. Respecto al uso de la simetría, el mayor grado de detalle dificulta la corrección posterior por

lo que es más conveniente ir construyendo el modelo completo, empleando la simetría cuando interesa.

Al igual que en el caso anterior, se ha trabajado con capas en función de los materiales para agilizar posteriormente el trabajo de texturización. En el caso de edificios de varias plantas resulta recomendable crear una capa por planta para cada material ya que facilita notablemente la visualización del conjunto durante el levantamiento.

III.3. Medición in-situ de parámetros acústicos

Para determinar el comportamiento acústico real de la Basílica se han realizado dos campañas de medidas de parámetros acústicos, correspondiendo con las configuraciones propias del habitual uso para el culto y de la representación del Misteri. El procedimiento seguido ha sido el mismo en ambos casos variando únicamente el número de posiciones registradas y se describe a continuación.

El protocolo de medidas acústicas llevado a cabo es el establecido por la norma internacional ISO 3382 en la que se describe tanto el procedimiento de medición incluyendo las condiciones de medida, el número de posiciones mínimo necesario así como los equipos a utilizar (ISO3382, 2009)

El proceso consiste en excitar la sala utilizando un sistema de emisión sonora y registrar la respuesta acústica de la misma para, a partir de esta señal determinar los valores de los parámetros acústicos objetivos mediante un software especializado. Para ello se ha empleado la instrumentación homologada perteneciente al Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-VEG (ACUSVIRT).

III.3.1. Equipos e instrumentación de medida

El sistema de emisión sonora utilizado ha incluido un PC, una tarjeta de sonido profesional (modelo VXpocket V2), una fuente dodecaédrica (modelo DO12: potencia nominal 600W, potencia sonora > 120 dB, formada por 12 altavoces que se asemeja a una fuente con emisión omnidireccional) y un amplificador M-1000 (Nivel de potencia de salida RL=4Ω: 520W+520W) cuya elevada potencia minimiza el efecto del ruido de fondo.

Para el registro de la respuesta de la sala a la excitación sonora se han combinado tres tipos de micrófonos en función de los parámetros acústicos a determinar. Así el sistema de captación de señal ha estado formado por un PC, una tarjeta de sonido profesional (modelo VXpocket V2) y los micrófonos correspondientes en cada caso.

Para determinar los parámetros monoaurales se han empleado micrófonos omnidireccionales G.R.A.S. tipo 40 AK (Sensibilidad a 250Hz 50 mV/Pa, Rango

de frecuencias: 3.15 Hz-20 kHz, Límite superior de rango dinámico (3% Distorsión): 164 dBre. 20 μ Pa, Límite inferior de rango dinámico: 14 dB, re. 20 μ Pa). En el caso de los parámetros espaciales, se ha utilizado un micrófono multipatrón AT4050/CM5 (rango de frecuencias: 20–20000 Hz, sensibilidad: 15.8 mV, nivel de presión sonora máximo de 149 dB y patrones de direccionalidad: cardiode, omnidireccional, figura en oculto) y su correspondiente fuente de alimentación Phantom. Por último, para el cálculo de los parámetros binaurales se ha hecho uso de una cabeza artificial normalizada HEAD Acoustics HMS III.0 dotada de dos micrófonos omnidireccionales con una sensibilidad de 53 mV/Pa (respuesta de -3 dB/+0.1 dB en rango de frecuencias: 3 Hz-20 kHz; rango dinámico: typ>118 dB; nivel de presión sonora máximo de 145 dB).

En las figuras III.2 y III.3 están recogidos los equipos descritos y las diferentes conexiones entre ellos según el protocolo de medidas del grupo de investigación. Las figuras III.4 y III.5 muestran dos imágenes de la Basílica durante el proceso de medición.

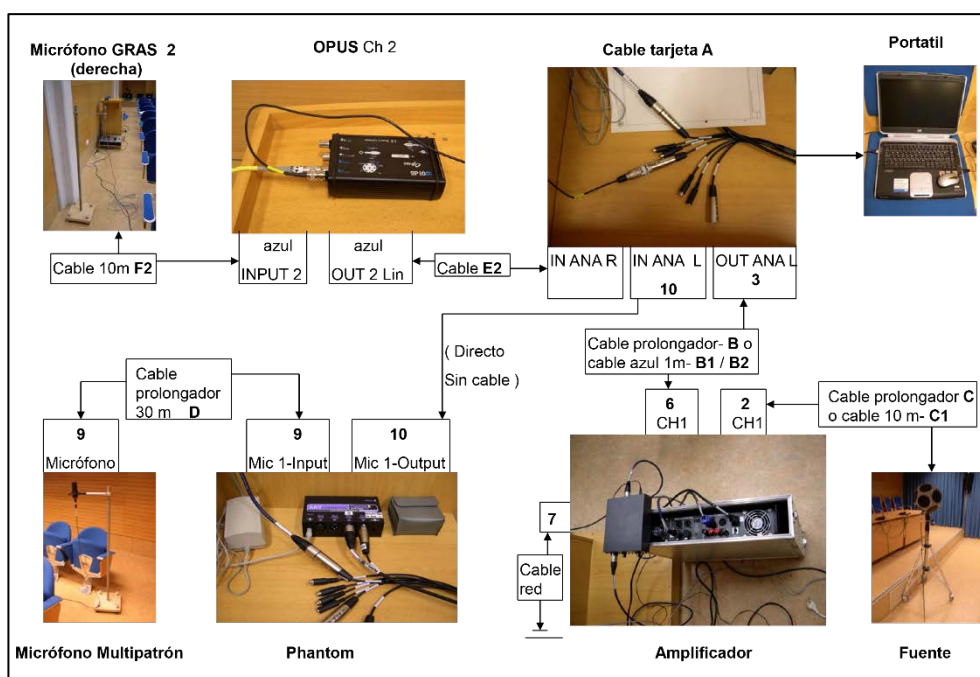


Figura III.2. Equipos e instrumentación empleados en las medidas de parámetros in situ con micrófonos grass y multipatrón.

Las respuestas de la sala se han grabado y procesado mediante el software WinMLS que permite tanto el registro de la señal como el posterior cálculo de los parámetros acústicos incluidos en la norma ISO 3382 y otros adicionales. Así para cada posición registrada se han determinado los siguientes parámetros:

- Monoaurales: tiempo de caída inicial EDT, tiempo de reverberación RT, tiempo central Ts, claridad para la palabra C50, claridad musical C80, fuerza sonora G, índice de transmisión de palabra STI, índice rápido de transmisión de la palabra RASTI, y pérdida de articulación de consonantes ALcons.
- Espaciales: fuerza lateral tardía LG, factor de energía lateral LF, y coseno del factor de energía lateral LFC.
- Binaurales: correlación cruzada interaural total IACCA, temprana IACCE y tardía IACCL.

Los resultados de los cálculos están recogidos en el anexo 1.

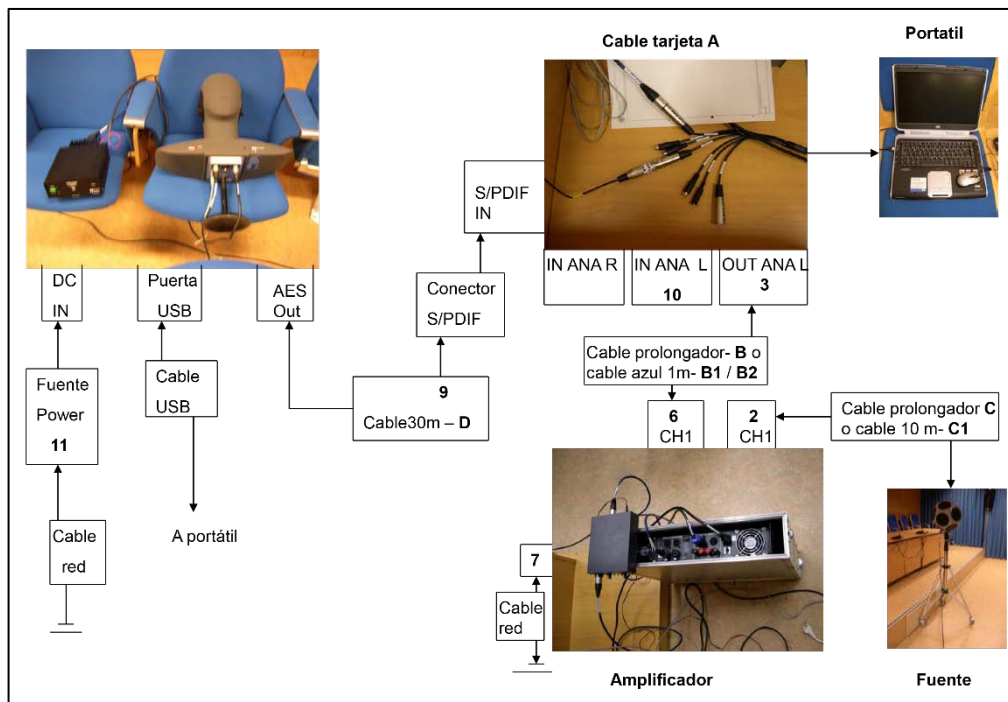


Figura III.3. Equipos e instrumentación empleados en las medidas de parámetros in situ con micrófonos cabeza binaural.



Figura III.4. Campaña de medidas en la Basílica con la figuración propia del culto.

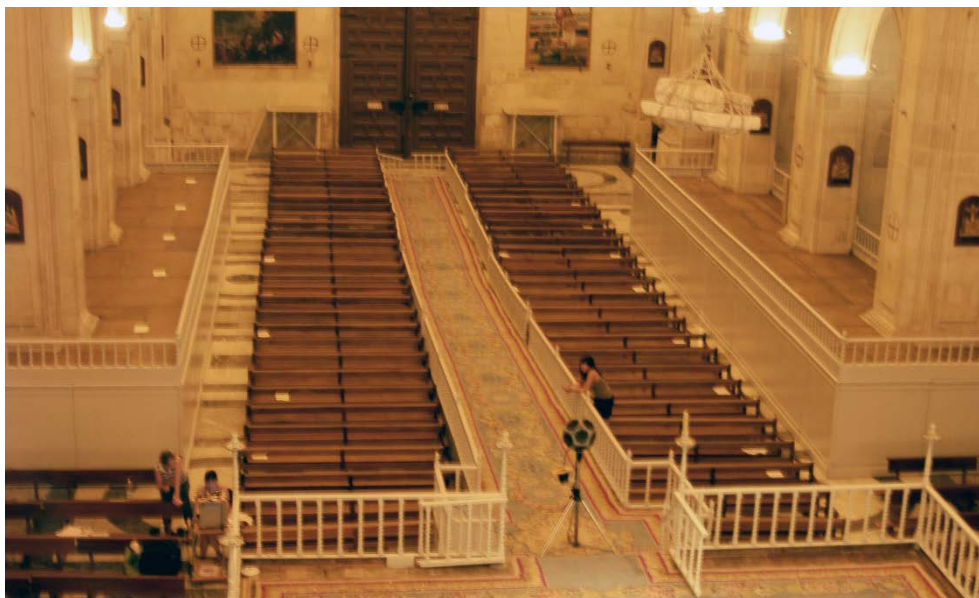


Figura III.5. Campaña de medidas en la Basílica con la figuración propia del Misteri.

III.3.2. Posiciones registradas

La norma ISO 3382 establece que las posiciones de medición tanto de la fuente como de los receptores deben corresponder con las habituales de las fuentes naturales y oyentes respectivamente. Por esta razón las medidas se han realizado con dos posiciones de fuente significativas de los dos usos principales, situándola en primer lugar en el altar desde el que se celebra la misa y en segundo lugar en el centro de la cúpula donde se coloca el cadafal en el que se desarrolla gran parte de la representación del Misteri.

En cuanto a los receptores, se han registrado un total de 37 posiciones en la campaña de medidas realizada con la Basílica configurada para el culto. En el caso de la configuración propia de la representación del Misteri el número de puntos registrados asciende a 86 y se reparten entre la planta baja, incluyendo el ábside y la girola, y la superior, ya que en el citado uso dichos espacios también son ocupados por el público.

Tabla III.2. Número de posiciones registradas por zonas para cada configuración de uso.

Zona	Configuración culto	Configuración Misteri
Nave	27	27
Transepto	6	12
Capillas	4	8
Tribunas de madera	-	12
Ábside	-	4
Girola	-	2
Balcones	-	21

En ambos casos el número es muy superior al exigido por la norma ISO 3382. Las figuras III.6, III.7 y III.8 muestran la ubicación de fuentes y receptores para cada una de las configuraciones de uso.

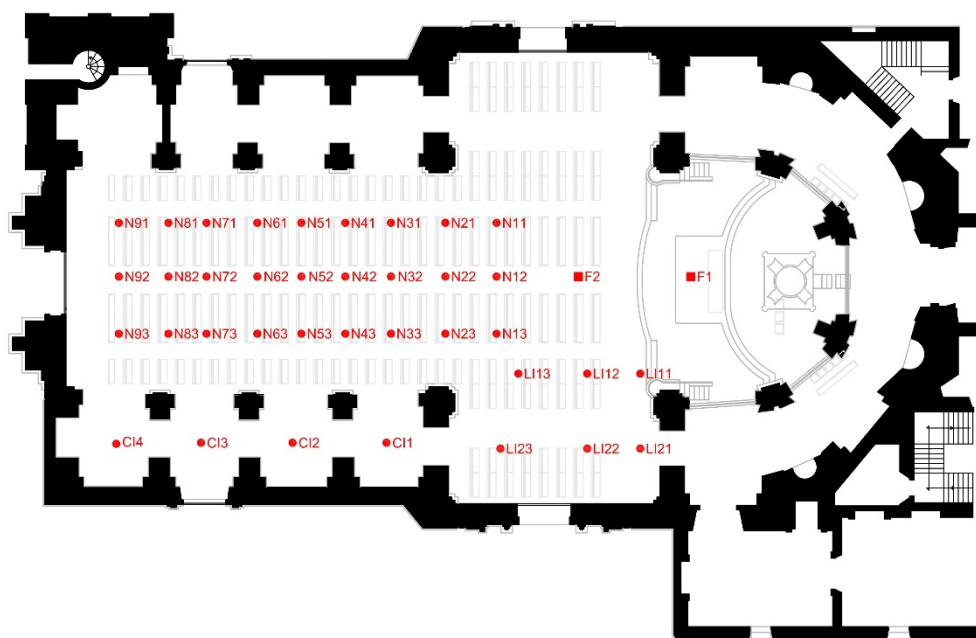


Figura III.6. Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica para el culto.



Figura III.7. Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica en la planta baja, para el Misteri.

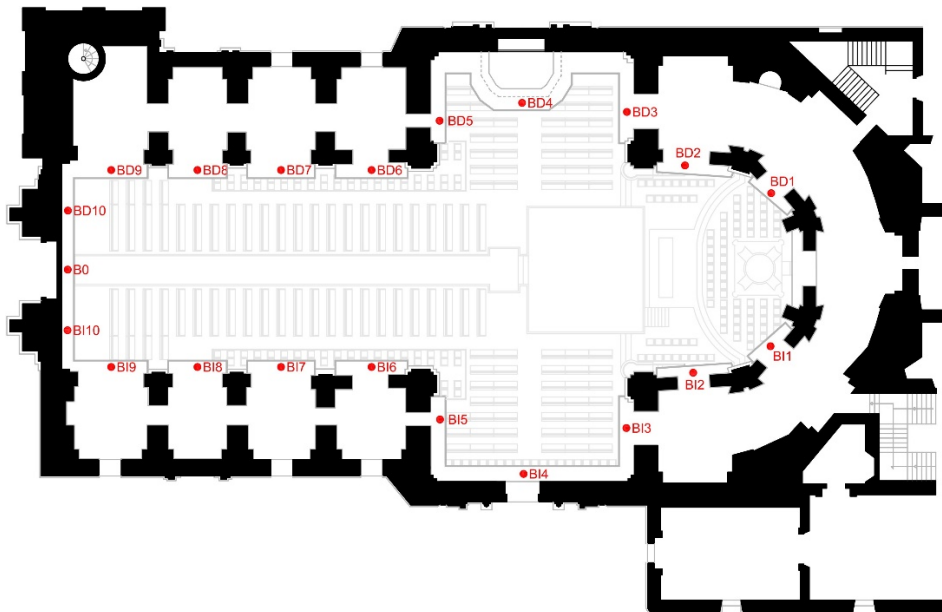


Figura III.8. Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica en la planta superior, para el Misteri.

III.3.3. Condiciones de medida

Las medidas se realizaron con la Basílica cerrada al público y durante la noche, con el fin de que el ruido de fondo existente fuera el mínimo posible y evitar posibles interferencias que alteraran los resultados de las medidas. El nivel de ruido de fondo existente en la Basílica durante el proceso era de 28,3 dB, muy inferior al de emisión de la fuente.

III.3.4. Protocolo de medida

El método empleado es el desarrollado en colaboración con otras universidades españolas en el proyecto coordinado BIA2003-09306-C04-01 "Establecimiento de parámetros acústicos determinantes de la calidad percibida en salas de conciertos y auditorios. Propuesta para su aplicación en los proyectos de nueva planta o rehabilitación" entre 2003 y 2006; y en el proyecto BIA2008-05485 "Estudio de parámetros objetivos y subjetivos evaluadores de la calidad acústica en salas, auditorios y edificios del patrimonio histórico-artístico. Validación de un protocolo de calidad acústica, mediante entornos virtuales para su aplicación en proyectos de nueva planta y/o rehabilitación". Se basa en la obtención de las respuestas impulsivas (IR) de la sala que la caracterizan acústicamente y a partir de las cuales se han calculado los parámetros acústicos.

Dado el tiempo necesario para llevar a cabo las medidas, se realizó un estudio previo de la sala para determinar las posiciones idóneas de fuentes y receptores y optimizar el trabajo de campo. Las fuentes dodecaédricas se han situado a 1,50 metros de altura, mientras que los micrófonos se han colocado a una distancia de 1,20 metros del suelo, correspondiendo con la altura media de los oídos de una persona sentada en los bancos.

Una vez establecidas las posiciones de fuentes y receptores y conectados los equipos, se ha procedido a la configuración del software WinMLS. Cada uno de los tres tipos de micrófonos utilizados requiere de unos ajustes concretos. La emisión sonora puede realizarse utilizando diferentes tipos de señal, en este caso se ha empleado una señal "sweep" también llamada "barrido senoidal" que cubre todo el rango de frecuencias audibles excitando sólo una frecuencia a la vez lo que permite concentrar la energía y facilita separarse del ruido de fondo existente en la sala. El rango de la señal se ha ajustado de manera que cubriera todas las bandas de octava entre 125 y 4000 Hz. Por otra parte, es necesario que el nivel de la emisión sea al menos 45 decibelios superior al ruido de fondo.

Siguiendo estas pautas se ha procedido a desplazar los micrófonos G.R.A.S.S. situándolos en las diferentes posiciones de registro previamente establecidas, emitiendo la señal de excitación y obteniendo la respuesta impulsiva de la Basílica en cada uno de los puntos, y se ha repetido el proceso para el caso del micrófono multipatrón y la cabeza. Las respuestas obtenidas in

situ se han procesado posteriormente en el laboratorio utilizando el software WinMLS para calcular los parámetros acústicos.

III.4. Simulación acústica

La simulación acústica tiene su origen en los modelos computacionales de los años 60 (Krokstad et al. 1968; Schroeder, 1965; Schroeder et al. 1962) pero fue a partir de la década de los 90 cuando se desarrolló y perfeccionó permitiendo describir la propagación del sonido en términos de ondas o partículas. Los modelos de ondas aportan resultados muy precisos para frecuencias aisladas pero requieren de mucho tiempo de cálculo cuando se trabaja con mayor número de frecuencias o cuando las salas son complejas. En los modelos de partículas, la propagación sonora se asocia a partículas desplazándose a la velocidad del sonido que cumplen con las leyes de la geometría óptica, esta técnica se denomina “modelo de trazado de rayos” (Vorländer, 1989). La simulación acústica se basa en la acústica geométrica (Vorländer, 2008) consistiendo en la construcción de un modelo simplificado de la sala a cuyos planos se les asignan unos materiales con determinados coeficientes de absorción y difusión que permiten calcular, mediante un software especializado, los parámetros que definen el comportamiento acústico del espacio.

III.4.1. Software empleado

La presente investigación se ha realizado utilizando el software CATT-Acoustic v9.0b. (Dalenbäck, 2011) Es un programa de simulación y auralización del campo acústico de recintos que emplea algoritmos basados en la teoría geométrica. El motor de cálculo TUCT (The Universal Cone Tracer) dispone de tres algoritmos diferentes para la generación de ecogramas, respuestas impulsivas y el cálculo de parámetros acústicos descriptivos por frecuencias en bandas de octava para cada pareja fuente-receptor. Por otra parte, dispone de un algoritmo de mapeado del área de audiencia que ofrece una representación gráfica de los resultados.

III.4.2. Procedimiento

Como se ha comentado, la simulación acústica se basa en un modelo virtual de la sala al que se le asignan unas determinadas propiedades. La naturaleza de los algoritmos de trazado de rayos obliga a que el modelo cumpla una serie de restricciones. El modelo debe construirse con planos ya que los programas de simulación no admiten sólidos. Por otra parte, la construcción de modelos geométricos muy detallados no garantiza una mayor precisión en el cálculo si las características acústicas (absorción y difusión) asignadas a los materiales no se aproximan suficiente a las reales. No obstante se ha probado que modelos geométricos simplificados con propiedades acústicas precisas aportan buenos

resultados (Siltanen et al., 2008; Martellotta, 2009). Además, los programas de simulación acústica exigen que los modelos estén totalmente cerrados para que los rayos que simulan las ondas sonoras reboten en las superficies sin producirse escapes y un mayor número de superficies aumentará las posibilidades de que se produzcan errores.

Siguiendo estas premisas se han construido dos modelos simplificados, uno de la Basílica en su estado habitual, y otro introduciendo las modificaciones espaciales que tienen lugar para la representación del Misteri. El levantamiento se ha realizado combinando los programas de diseño AutoCAD y SketchUp. El primero cuenta con mayor grado de precisión y se ha empleado para construir una alámbrica que posteriormente se ha exportado al segundo para conformar las superficies, ya que este último admite caras con mayor número de lados reduciendo significativamente los planos necesarios y dispone de un plugin que permite la exportación del modelo al software de simulación acústica. Los planos que delimitan los modelos se han agrupado en diferentes capas en función de los materiales para facilitar la asignación de sus características acústicas. A cada material se le ha otorgado un coeficiente de absorción y uno de difusión para las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

Respecto a los coeficientes de dispersión, se han establecido tres niveles de dispersión en función de la irregularidad de las superficies, de acuerdo con investigaciones similares (Alonso et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) y cuyos valores se muestran en la tabla III.3.

Los materiales empleados y los coeficientes de absorción asignados a cada uno de ellos, se recogen en la tabla III.4.

Tabla III.3. Niveles de dispersión y coeficientes empleados por frecuencias.

Nivel dispersión	125	250	500	1000	2000	4000
Baja (B)	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Media (M)	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
Alta (A)	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80

Tabla III.4. Materiales empleados en la simulación, coeficientes de absorción por frecuencias y niveles de dispersión asignados. Se muestran los porcentajes de cada material respecto al total para los modelos de culto y Misteri y las fuentes de las que se han extraído los valores.

Material	Área % culto	Área % Mis	Coeficientes absorción utilizados						Disp.
			125	250	500	1000	2000	4000	
Fábrica de piedra ¹	62,5	63,9	0,04	0,03	0,025	0,025	0,02	0,02	B
Bóvedas ²	12,7	13,2	0,04	0,03	0,025	0,025	0,02	0,02	M
Mármol pavimento ³	7,9	6,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	B
Cúpula ³	2,6	-	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	M
Bancos ²	5,1	2,8	0,10	0,15	0,18	0,20	0,20	0,20	A
Vidrieras ³	1	0,3	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04	B
Retablo ⁴	0,9	0,9	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	M
Pechinas ¹	0,8	0,8	0,04	0,03	0,025	0,025	0,02	0,02	A
Órgano (estimado)	0,8	0,8	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	A
Mármol Rojo ²	0,7	0,7	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	B
Puertas ²	0,6	0,6	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	B
Altar ²	0,1	0,1	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	B
Pavimento cerámico ²	4,3	4,3	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	B
Madera tribunas y cadafal ⁵	-	2,6	0,35	0,25	0,18	0,30	0,35	0,05	B
Alfombra ⁶	-	1,1	0,02	0,03	0,05	0,10	0,30	0,50	B
Cielo ²	-	1,4	0,10	0,38	0,63	0,52	0,55	0,65	B

¹ Ajustado durante el proceso de calibración del modelo de culto

² Vorländer, 2008

³ Cox and D'Antonio, 2009

⁴ Martellotta, 2009

⁵ Ajustado durante el proceso de calibración del modelo del Misteri

⁶ Biblioteca de materiales de CATT-Acoustics

Una vez construido el modelo y asignadas las propiedades a los materiales se establece la posición de fuentes y receptores y se procede a la simulación. Si se han realizado medidas de parámetros acústicos, como es el caso, se colocarán en el mismo lugar para poder ajustar y calibrar el modelo mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los reales.

III.4.3. Simulación de la Basílica en las condiciones de medida

III.4.3.1. Ajuste para la disposición del culto

Se ha partido del modelo correspondiente a la iglesia con la configuración propia de la celebración del culto. El modelo construido con el software SketchUp se ha exportado a CATT-Acoustics para proceder a la simulación acústica. Una vez exportado se ha realizado una primera fase de trabajo destinada a depurar el modelo y eliminar los errores que contenía y que impedían la simulación tales como planos coincidentes, bordes de planos que se cortan, planos alabeados o con las normales al revés.

Al modelo depurado se le han asignado las absorciones correspondientes a cada material y se ha procedido a la calibración. Las absorciones de los materiales se han tomado de valores de catálogo al no haber procesado todavía las medidas in situ y con el objetivo de comparar resultados en un futuro. A la hora de calibrar el modelo se han tomado como base el tiempo de reverberación medido y se han ido ajustando las absorciones del material "piedra" por ser el predominante y contar con un alto grado de incertidumbre ya que las referencias bibliográficas no cuentan con valores propios de muros de piedra vista como los que constituyen la basílica.

Una vez ajustadas las absorciones de forma que las diferencias entre el T-30 medido y el dado por el software eran inferiores a un 5% se ha lanzado una primera simulación de cara a comparar el resto de parámetros de la sala. Ha sido necesario reajustar los valores tanto de absorción de la piedra como de difusión para conseguir diferencias aceptables entre los valores medidos y simulados en el resto de parámetros. Tras un proceso iterativo de modificación de los valores de absorción y comparación de los valores medidos y simulados, se ha conseguido ajustar el modelo obteniendo diferencias inferiores a 2 JND (just-noticeable difference) considerado el valor máximo admisible. El JND se define como la menor diferencia detectable. Los valores establecidos en las normas ISO (ISO 3382, 2009) hacen referencia a las condiciones habituales de teatros y auditorios en los que los tiempos de reverberación se sitúan entre 0,5 y 2 segundos. Sin embargo, en espacios reverberantes como las iglesias la percepción puede variar por lo que Martellotta (2010) propone algunos valores alternativos para este tipo de espacios. La tabla III.5 muestra los valores de JND empleados en el estudio.

El proceso descrito se ha realizado considerando la fuente situada en el altar, una de las dos posiciones en las que se tomaron medidas. Una vez ajustados todos los parámetros se ha llevado a cabo una simulación con la otra posición de fuente medida, en el centro de la cúpula, a modo de comprobación.

III.4.3.2. Ajuste para la disposición del Misteri

Paralelamente al trabajo de ajuste y calibración del modelo para culto se ha repetido el proceso de depuración y corrección de errores en el modelo propio de la representación del Misteri. En este caso se han mantenido los coeficientes de absorción definidos en la calibración del modelo para culto y se ha utilizado como material de ajuste la madera de las tribunas y el cadafal.

III.4.4. Simulación en condiciones diferentes a las de medida

Con los modelos calibrados para la situación en la que se realizaron las medidas, y una vez establecidos los coeficientes de absorción propios de los diferentes materiales, se han modificado los modelos introduciendo la audiencia y se han repetido las simulaciones lo que ha permitido establecer las diferencias entre la sala llena y vacía.

III.5. Análisis estadístico de resultados

A la hora de caracterizar la sala y analizar la validez de la simulación se han seleccionado algunos parámetros teniendo en cuenta los calculados por los software empleados en la investigación y los más comúnmente utilizados por la comunidad científica. Los parámetros seleccionados se han dividido en cuatro grupos asociados con las principales cualidades subjetivas de las salas y se definen en el capítulo II.3 de esta tesis. Se han estudiado los siguientes:

- Parámetros de reverberación: tiempo de reverberación (RT) y tiempo de caída inicial (EDT).
- Parámetros de energía: claridad del habla (C50), claridad musical (C80), tiempo central (Ts) y fuerza sonora (G),
- Parámetros de inteligibilidad: índice de transmisión de la palabra (STI).
- Parámetros de espacialidad: índice de correlación cruzada interaural (IACC) e índice de fracción lateral (LF).

Se han comparado tanto los valores reales como des de el punto de vista perceptivo a partir del JND.

Tabla III.5. Valores de JND para los distintos parámetros acústicos.

Cualidad subjetiva	Parámetro	Frecuencias para valor medio (Hz)	Valor JND
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora, G	500-1000	1 dB
Reverberación percibida	Tiempo de caída inicial, EDT	500-1000	5%
Claridad del sonido percibida	Claridad, C80	500-1000	1dB (1,5 dB*)
	Definición, D50	500-1000	0,05
	Tiempo central, Ts	500-1000	10 ms (8,5%*)
Amplitud de fuente aparente	Índice de fracción lateral, LF	125-1000	0,05

* Valores alternativos para espacios reverberantes (Martellotta, 2010)

Todas las medidas realizadas se introdujeron en un fichero excel y posteriormente se exportaron a uno SPSS v.22.0 para su análisis estadístico. Los parámetros acústicos se valoraron en función de la frecuencia y para todos ellos se presentan diagramas de cajas para evidenciar la forma de la distribución, la mediana, los percentiles del 5%, 25%, 75% y 95% y los valores fueran de rango (outliers) de cada uno de ellos. Los parámetros se han caracterizado por la media y la desviación típica para cada frecuencia.

Se ha analizado el comportamiento de los parámetros acústicos medidos y simulados para cada frecuencia en función de la zona de interés de templo y en las dos situaciones de culto y de Misteri.

Para la comparación de medias entre los valores medidos y simulados se ha utilizado, coeficientes de correlación intraclase (ICC) con estadístico alfa de Crombach para clasificar la correlación entre los dos tipos de valores (medidos y simulados). Se han obtenido así mismo las correspondientes rectas de regresión valorando, además del coeficiente de correlación r-Pearson los valores de la pendiente y la ordenada en el origen, valorando que el IC95% de la pendiente incluya el 1 y el de la ordenada en el origen el 0, para asegurar que no existe diferencia estadísticamente significativa entre valores medidos y simulados.

La influencia de los factores (zona del templo, acabado de las superficies, etc.) se ha realizado a partir del estudio de la ANOVA de varios factores, con test de Bonferroni o Scheffé para las comparaciones múltiples. Para la comparación entre medidos y simulados en este tipo de estudio se ha utilizado la ANOVA de medidas repetidas.

En todos los casos la prueba se consideró significativa para $p < 0,05$.

III.6. Auralización

En el proceso de auralización se ha convolucionado una grabación anecoica con la respuesta impulsiva de la sala (IR) obtenida en las simulaciones. La orientación de los receptores se ha llevado a cabo considerando una serie de funciones de transferencia y orientando todos los receptores mirando a la fuente durante la simulación.

Se han seleccionado tres tipos de fuente: una lectura, música de órgano y el canto de algunas piezas del Misteri. La auralización de las tres fuentes se ha realizado para diferentes posiciones de receptor distribuidas en las zonas de la iglesia estudiadas, y la fuente se ha situado en el altar desde el que se oficia la misa, el lugar en el que se encuentra el órgano, y el andador y cadafal en los que se representa el Misteri, respectivamente.

En el caso de las señales del habla y el canto del Misteri se han realizado auralizaciones también a partir de las medidas permitiendo su comparación con las simuladas.

Capítulo IV.
Resultados y
discusión

IV.1. Construcción de los modelos

IV.1.1. Características de las simulaciones gráfica y acústica

Las técnicas de simulación han sido ampliamente utilizadas en diferentes campos y objetivos. En este trabajo, para lograr nuestro objetivo, se combinan técnicas de simulación gráfica y acústica.

Las técnicas de simulación gráfica permiten la visualización de aquello sobre lo que se está trabajando y por tanto, una mayor comprensión. Así, desde hace años, la simulación gráfica se ha utilizado para observar y comprender los complejos resultados de la simulación acústica de recintos (Stettner y Greenberg, 1989; Tsingos et al., 2001); para percibir el entorno de estudio de forma más realista (Pope y Chalmers, 1999); en la creación de entornos virtuales (Huopaniemi et al., 1996); en la reconstrucción de edificios (Dias et al., 2008; Rindel et al. 2002); entre otros.

En el campo de la acústica, de forma equivalente, las técnicas de simulación permiten obtener la respuesta acústica de un espacio, abierto o cerrado, a partir de una serie de parámetros. El modelo virtual empleado en la simulación gráfica debe ser lo más detallado posible para obtener una visión realista al colocar la textura correspondiente a cada elemento y superficie. Esto se traduce en modelos complejos compuestos por un elevado número de caras.

Sin embargo, los requerimientos de la simulación acústica son diferentes, ya que la naturaleza de los algoritmos de trazado de rayos obliga a que el modelo cumpla una serie de restricciones. Además, diferentes investigaciones han demostrado se obtienen buenos resultados representando la complejidad de la sala mediante una caracterización acústica rigurosa de las superficies del modelo a partir de los coeficientes de absorción y difusión (Siltanen et al., 2008; Martellotta, 2009). Por otro lado, a mayor número de superficies, mayor es la posibilidad de aumentar el número de errores. Por tanto, para este proceso, como las exigencias eran totalmente distintas, se requería un modelo lo más sencillo posible que redujera las posibilidades de error y el tiempo de cálculo, que está limitado tanto por la capacidad del ordenador como por la operatividad del proceso.

Los programas de simulación acústica exigen que los modelos estén totalmente cerrados para que los rayos que simulan las ondas sonoras reboten en las superficies sin producirse escapes. Cuanto mayor es el número de caras que compone el modelo mayor es la cantidad de aristas y vértices de encuentro entre caras por los que pueden producirse los escapes, por ello la complejidad espacial y geométrica de las salas de estudio debía simplificarse. El modelo acústico debe, por tanto, elaborarse con el mínimo número de planos sin perder las características esenciales del espacio que le otorgan un determinado comportamiento acústico.

IV.1.2. Los primeros modelos

El estudio de los espacios mediante entornos virtuales se realiza a partir de un modelo tridimensional del mismo que reproduce las características acústicas y geométricas de las distintas superficies que lo componen y lo cierran. La investigación sobre la Basílica de Santa María de Elche se engloba dentro de un proyecto que consistía en el análisis de varios edificios patrimoniales emblemáticos, se eligieron los siguientes:

- Catedral Metropolitana de Valencia
- Palau de la Música de Valencia
- Palau de les Arts “Reina Sofia”
- Lonja de la Seda o de los Mercaderes de Valencia
- Basílica de Santa María de Elche (con el montaje para la representación del Misteri d’Elx y sin él)

La construcción de cada modelo tridimensional se realizó a partir de la documentación gráfica de la que se disponía. En la mayoría de los casos, esta documentación incluía planta y sección de la sala. Excepcionalmente, como en el caso de la Basílica de Elche, fue necesario dibujar las secciones a ordenador ya que sólo se contaba con los planos en papel.

A partir de los planos se procedió a realizar los modelos en 3D utilizando la herramienta de dibujo asistido por ordenador AutoCAD para posteriormente exportarlos a los software de simulación acústica y gráfica. Se partió de la planta de cada sala colocando sobre ella la altura correspondiente a cada punto del espacio. Las alturas se midieron en la sección correspondiente. La complejidad de algunas de las salas, como es el caso de la Catedral de Valencia y la Basílica de Santa María, hizo que la documentación resultara insuficiente. Por este motivo fue necesario recurrir a la toma de medidas, y numerosas fotografías y visitas que proporcionaran un conocimiento global del espacio a modelar.

En un primer momento se pensó en utilizar los mismos modelos tanto para la simulación visual como para la acústica, no obstante debido a los diferentes requerimientos exigidos en cada caso y en base a estudios que corroboraban la necesidad de simplificar, se tomó la decisión de realizar dos modelos para cada una de las salas.

A partir de los modelos complejos empleados en la simulación visual se realizaron otros más sencillos, reduciendo notablemente el número de planos para hacerlos compatibles con los programas de simulación acústica y reducir el número de errores (Planells et al., 2011).

La tabla IV.1.1 muestra el número de polígonos empleados en los modelos para cada uno de los edificios estudiados y las figuras IV.1.1 y IV.1.2 algunas vistas interiores de los primeros modelos construidos para otras salas y los primeros modelos simples y complejos de la Basílica de Santa María, tanto para el caso del culto como del Misteri.

Tabla IV.1.1. Número de polígonos que forman los primeros modelos simples y complejos para cada una de las salas estudiadas.

Sala de estudio	Número polígonos modelo	
	Complejo	Simple
Catedral de Valencia	12778	2399
Palau de la música	3685	1040
Palau de les Arts "Reina Sofía"	6520	2272
Lonja de Valencia	18262	3875
Basílica Elche	4114	2334
Basílica Elche con Misteri	4106	2450

Las mayores dificultades en estas primeras etapas se encontraron a la hora de compaginar la precisión requerida por los software de simulación acústica con las limitaciones de los programas de dibujo y modelado:

- Fue imprescindible modelar con elementos del tipo cara 3D ya que los programas de simulación acústica no admiten sólidos.

- Para que el modelo estuviera completamente cerrado y evitar fugas los vértices de todas las caras adyacentes debían coincidir exactamente. Aquí se encontraron dificultades importantes en elementos complejos como nervios y bóvedas de los primeros modelos y a que la ubicación de algunos puntos concretos en el espacio resultó muy complicada. La experiencia de modelos iniciales permitió superar estas dificultades en los posteriores.

La principal limitación de AutoCAD a la hora de modelar era que sólo permitía realizar caras de tres o cuatro lados. Como consecuencia, dada la complejidad de las salas incluso tratándose de un modelo simplificado, fue necesario un mayor número de caras en cada superficie aumentando las posibilidades de errores y escapes entre ellas. Se detectó asimismo cierta falta de precisión ya que muchas veces los vértices eran aparentemente coincidentes siendo necesario ampliar extremadamente la vista del encuentro entre caras para apreciar una mínima separación entre ellos y a que esto conlleva

posteriormente un error. Por otra parte, señalar que no permite conocer el sentido de las normales de las caras por lo que resultó imposible saber si las superficies estaban o no bien orientadas hasta que no se introdujo el modelo en el programa de simulación acústica.

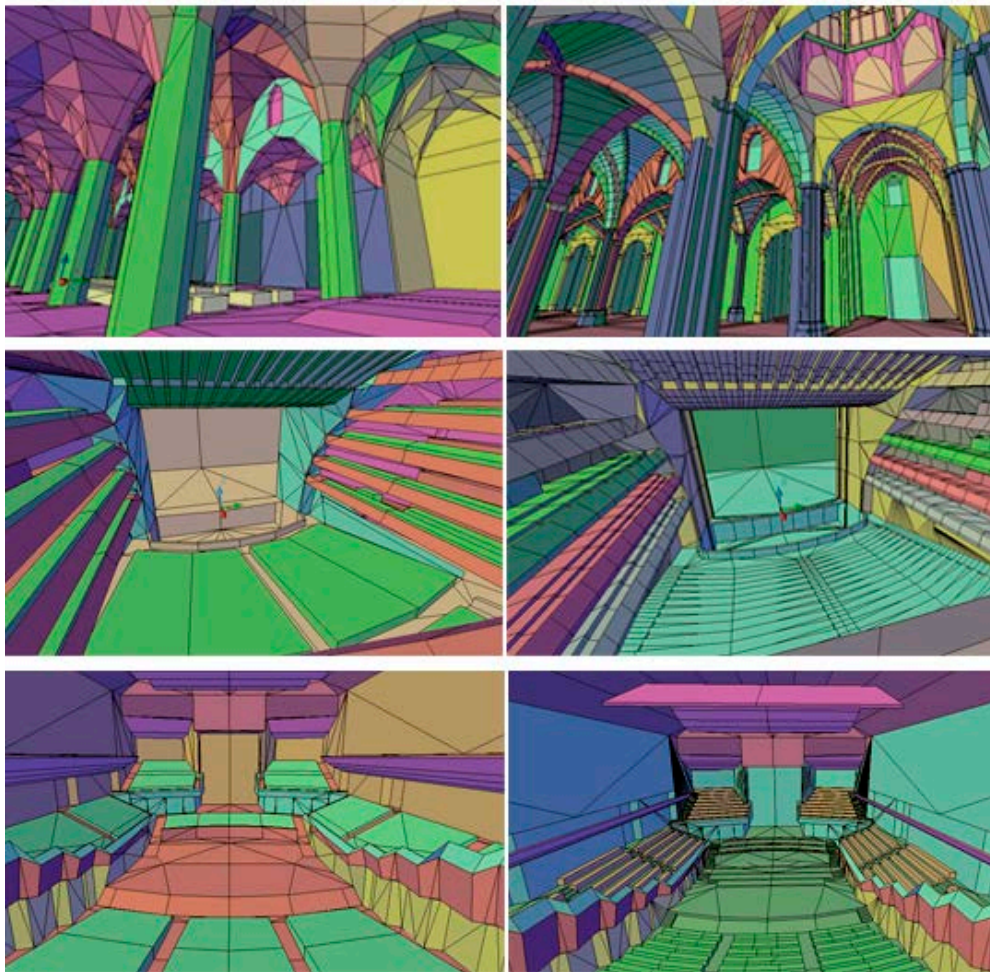


Figura IV.1.1. Modelos simples y complejos iniciales de la Catedral, el Palau de Les Arts y el Palau de la Música de Valencia.



Figura IV.1.2. Modelos simples y complejos iniciales de la Basílica de Santa María.

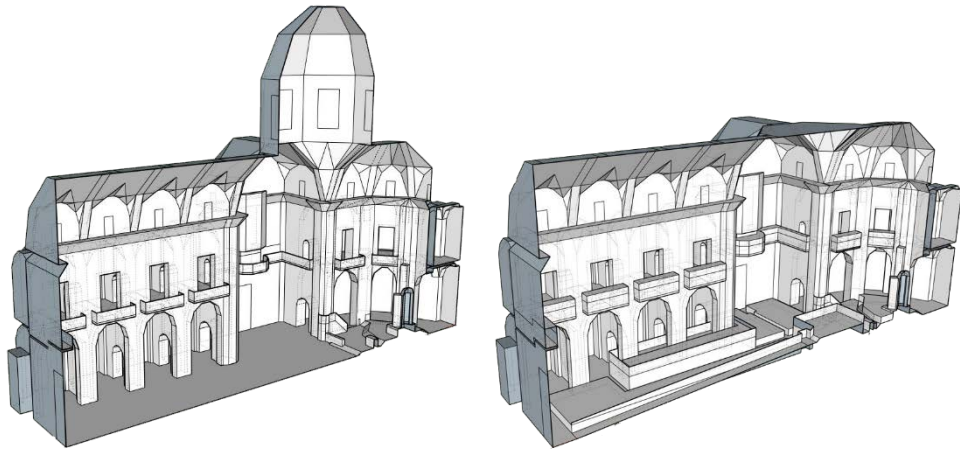


Figura IV.1.3. Modelos simples finales de la Basílica de Santa María.

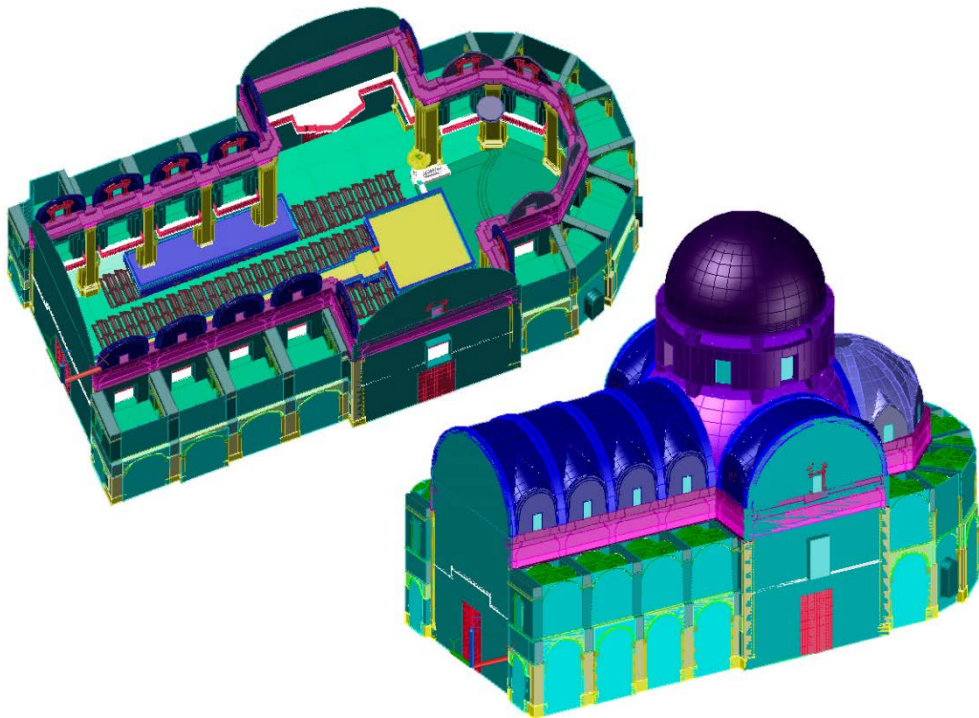


Figura IV.1.4. Modelo complejo final de la Basílica de Santa María.

IV.1.3. Los modelos finales

El trabajo inicial realizado permitió el desarrollo de herramientas de soporte a la corrección (Montell et al., 2010a) y se concluyó la necesidad y conveniencia de construir dos modelos diferentes empleando los elementos y programas distintos de forma que se adaptaran a los requerimientos específicos en cada caso. Los modelos han sufrido una serie de cambios, adaptándose a la problemática concreta y resolviendo las dificultades encontradas en las etapas iniciales de la investigación.

La construcción de dos modelos diferentes para la simulación gráfica y acústica respectivamente, permite emplear diferentes tipos de software y combinarlos seleccionando el más adecuado en cada caso y aprovechando las ventajas que ofrece cada uno de ellos. AutoCAD es el programa de diseño asistido por ordenador más extendido y, como ya se ha comentado anteriormente, cuenta con gran precisión y un elevado número de opciones que facilitan el levantamiento de geometrías complejas como la de la Basílica de Santa María. No obstante, como se ha indicado, presenta dos dificultades importantes en los modelos acústicos: la limitación del número de lados de las caras 3D y la imposibilidad de conocer la orientación de las normales de las caras de manera inmediata. SketchUP por su parte, no limita el número de lados de las caras y permite detectar y corregir la orientación de las normales de todos los objetos, ya que los reversos presentan siempre un color gris, sin embargo, el número de herramientas que ofrece es más reducido.

Dadas las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, los modelos acústicos finales se han construido combinando ambos. Así, se han aprovechado las numerosas herramientas que ofrece el software y la comodidad que aporta el elevado conocimiento del mismo para construir una estructura alámbrica esquemática en AutoCAD situando en el espacio los puntos principales de la estructura de la Basílica.

Posteriormente, se ha exportado dicha estructura a SketchUP para conformar las superficies y cerrar el modelo. De esta manera se han reducido significativamente las superficies empleadas y se ha garantizado la correcta orientación de las normales, reduciendo los errores a corregir. Además, SketchUP dispone de un plugin que permite exportar el modelo al software de simulación acústica, optimizando el proceso. La figura IV.1.3 muestra los modelos acústicos finales.

Por otra parte, dadas las diferencias en el acondicionamiento del espacio para el culto y para la representación teatral, se han construido dos modelos diferentes incluyendo las disparidades mencionadas. El modelo detallado para la simulación gráfica se ha construido íntegramente empleando AutoCAD, para posteriormente exportarlo a 3ds Max con el fin de aplicarle las texturas e

iluminaciones correspondientes para obtener una visión realista del espacio, tal y como se desarrolla en el capítulo IV.3 de esta tesis.

La construcción de dos modelos diferentes ha permitido también emplear elementos distintos a las caras 3D, tales como sólidos y superficies, en el modelo detallado, que sí son compatibles con los programas de simulación gráfica y facilitan notablemente la construcción de geometrías complejas como es el caso de la Basílica. La figura IV.1.4 muestra el modelo complejo final construido con sólidos que puede compararse con el inicial de caras en la figura IV.1.5.

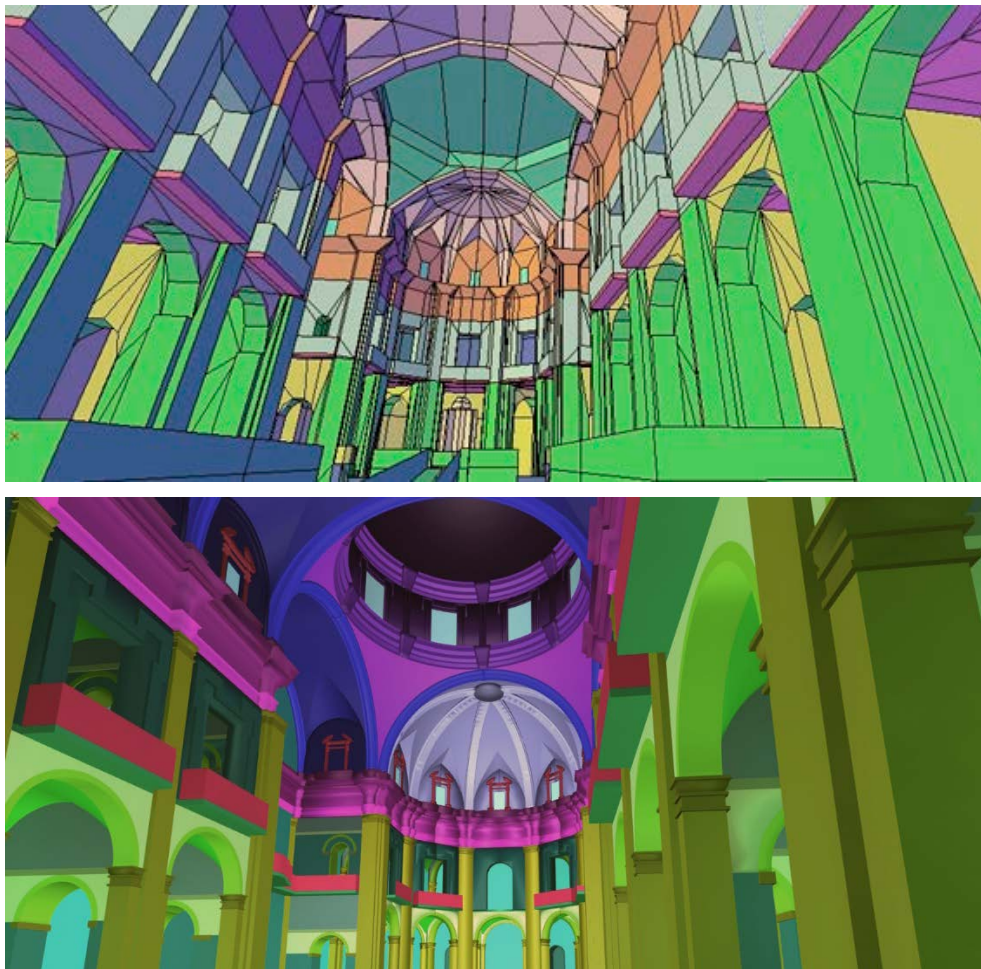


Figura IV.1.5. Interior del modelo complejo inicial del Misteri realizado con caras y el de culto construido con sólidos y superficies.

IV.1.4. Conclusiones

La construcción de maquetas virtuales de espacios tan complejos como la Basílica de Santa María para la simulación gráfica y acústica es un proceso costoso.

Los diferentes requerimientos de los modelos para la simulación gráfica y acústica hacen que resulte más eficiente la construcción de un modelo específico para cada caso.

Los modelos acústicos deben ser lo más sencillos posible desde el punto de vista geométrico manteniendo las características esenciales del espacio y reduciendo el número de planos que los componen, con un análisis exhaustivo del error. Es necesario tener en cuenta que deben construirse con caras y la orientación de la normal de éstas.

Los modelos gráficos por el contrario, deben ser lo más detallados posibles pudiendo emplearse diferentes tipos de elementos en su construcción, en función del programa de simulación gráfica elegido.

Los diferentes programas de diseño y simulación, tanto gráfica como acústica, ofrecen ventajas e inconvenientes que deben tenerse en cuenta para aprovechar la capacidad de cada uno de ellos al máximo. La combinación de varios puede optimizar el trabajo.

En este sentido, la experiencia y familiaridad de la persona que construye el modelo con los programas es determinante para agilizar el proceso.

IV.2.1.

**La acústica de la
Basílica para el culto**

IV.2.1.1. Configuración de la Basílica de Santa María para el culto

IV.2.1.1.1. Descripción

La configuración propia de la celebración del culto es la más habitual y sencilla, sin recubrimientos ni estructuras adicionales, tal y como se describe con detalle en el capítulo II.1.2 y se muestra en las figuras IV.2.1.1 y IV.2.1.2.

El espacio interior está formado por una nave única cubierta por una bóveda de cañón con lunetos, y cuatro capillas laterales a cada lado cubiertas por bóvedas de arista y comunicadas entre sí, y con el transepto, mediante perforaciones en los contrafuertes. Los brazos del transepto son cortos, ajustándose a la profundidad de las capillas. Tienen la misma anchura que la nave y están cubiertos también por bóvedas de cañón. En el crucero se encuentra una gran cúpula sobre tambor y pechinas. Cuenta también con un ábside cubierto por una bóveda de cuarto de esfera y rodeado por un deambulatorio. Sobre éste y las capillas se encuentran las tribunas, que se abren al ábside, a través de cuatro balcones, y a la nave mediante ocho balcones. Las tribunas situadas sobre las capillas se comunican con la ubicada sobre la girola y entre ellas mediante balcones corridos que rodean perimetralmente los brazos del transepto y los pies de la nave.

En cuanto a los materiales, todas las paredes y pilares son de fábrica de piedra vista, al igual que las bóvedas. La cúpula original de piedra se sustituyó por una de estructura metálica y ladrillo para aligerarla, por lo que el interior está enlucido con mortero y decorado con un fingido de sillar. El pavimento de la nave, capillas y girola es de mármol y se colocó en la reforma de los años 40. En el ábside se combina este pavimento con mármol rojo en los escalones y púlpitos. El pavimento original de la planta superior ha sido sustituido por baldosas cerámicas. Las barandillas de los balcones y los púlpitos son de barrotes metálicos, aunque en ocasiones especiales se cubren con telas pesadas de terciopelo rojo. A los pies de la nave y en los extremos del transepto hay tres grandes portones de madera. La decoración se concentra principalmente en las capillas y en el retablo mayor, en cuyo centro se sitúa el camarín de la virgen. El altar se encuentra cubierto por un atela. Como elementos importantes destacan el órgano y el tabernáculo de mármol del ábside.

El público se sitúa únicamente en los bancos de madera que se distribuyen entre la nave y el transepto orientados hacia el altar.



Figura IV.2.1.1. Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde los pies de la nave mirando hacia el altar.



Figura IV.2.1.2. Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde el crucero mirando hacia los pies de la nave.

IV.2.1.1.2. Zonificación y características geométricas

La Basílica de Santa María es un edificio complejo compuesto por varios espacios diferentes y, por tanto, la percepción sonora también lo será. En base a esto, se ha realizado una zonificación previa con el fin de garantizar que todas las posibles variaciones estuvieran recogidas en los resultados de la investigación. Por ello, y como realizan otros investigadores (Pedrero et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014), se han establecido tres zonas diferentes en las que la relación entre anchura, profundidad y altura, así como la interacción con la fuente son distintas: la nave, el transepto y las capillas, recogidas en la figura IV.2.1.3.

La nave presenta el espacio más amplio, con una gran profundidad, lo que supone una mayor variabilidad en la distancia entre la fuente y los distintos receptores. En el transepto la altura predomina sobre las otras dimensiones, mientras que las capillas son espacios mucho más pequeños y con una relación más igualitaria entre las tres dimensiones.

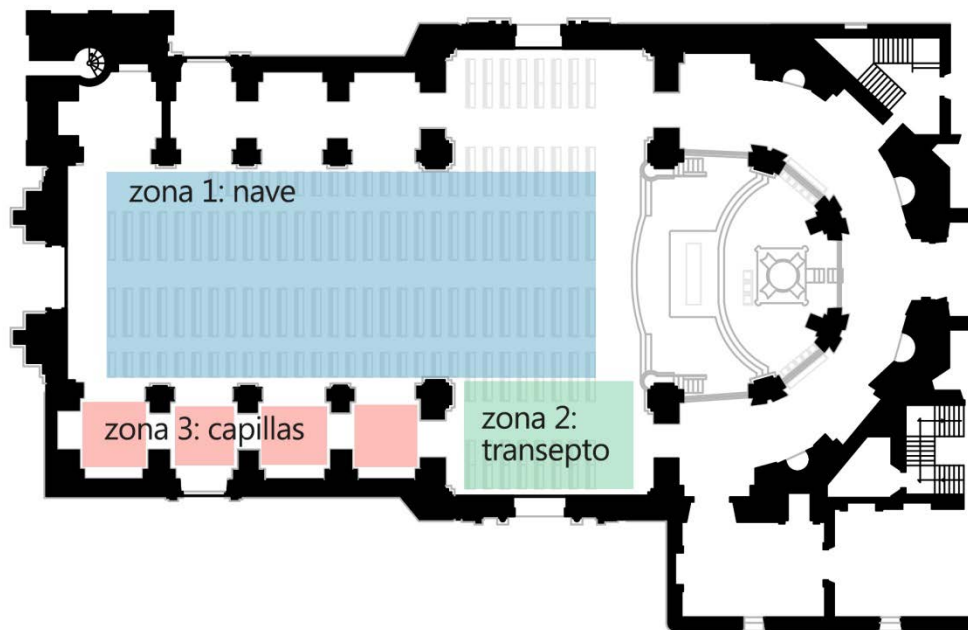


Figura IV.2.1.3. Zonas con características espaciales diferentes que pueden afectar al comportamiento acústico.

Las características geométricas de la Basílica en este caso son las que muestra la tabla IV.2.1.1.

Tabla IV.2.1.1. Características geométricas de la Basílica de Santa María en la configuración para el culto

Volumen	Altura nave / transepto	Altura crucero	Área audiencia	Vol/ área audiencia
25000 m ³	24 m	40,80 m	342 m ²	73,10 m ³ /m ²

Si analizamos los diferentes espacios que la componen por separado, se observan grandes diferencias entre ellos, tal y como se muestra en la tabla IV.2.1.2.

Tabla IV.2.1.2. Características geométricas de las distintas zonas que componen la Basílica en la configuración para el culto

Zona	Ancho*prof*altura	Volumen	Área audiencia	Vol/ área audiencia
Nave	13x30x24 m	9504 m ³	390 m ²	24,37 m ³ / m ²
Capilla	4x5x7,5 m	150 m ³	20 m ²	7,50 m ³ / m ²
Transepto	13x7x24 m	4160 m ³	91 m ²	45,71 m ³ / m ²

IV.2.1.2. Posiciones registradas

En el caso de la basílica acondicionada para el culto se han establecido 36 posiciones de receptor, distribuyéndolas en las tres zonas establecidas. Todas ellas se encuentran en la planta baja ya que la superior no suele utilizarse.

Así se han tomado medidas con dos fuentes en 27 puntos de la nave central, en el centro de las cuatro capillas del lado de la epístola y 6 posiciones en uno de los laterales del transepto.

Las fuentes se han situado en dos posiciones, en el altar de donde se oficia la misa y bajo la cúpula, donde se realiza gran parte de la representación del Misteri. En la nave central se han colocado tres receptores por fila, en un

total de 9 filas, coincidiendo con los pilares y los huecos de las capillas. En el transepto se han colocado en tres filas coincidiendo con las dos líneas de bancos. En las capillas, dada su reducida dimensión se han colocado en el centro de cada una de ellas. La metodología, equipos y procedimiento empleado se explican con detalle en el capítulo III, mientras que los resultados completos de las medidas se recogen en el anexo 1.

Cabe señalar que se han observado doubles pendientes en las respuestas impulsivas debidas a la existencia de volúmenes acoplados. La geometría del recinto condiciona completamente el comportamiento acústico y hace que la caída de la energía no sea uniforme con el tiempo.

IV.2.1.3. Modelo acústico

El modelo acústico final de la Basílica para el culto construido mediante el software de modelado SketchUp ha estado constituido por un total de 5199 aristas y 1989 planos. Un número muy inferior al de los primeros modelos, tal y como se detalla en el capítulo IV.1 de esta tesis. La figura IV.2.1.4 muestra dos vistas del modelo en las que se aprecia el interior y exterior del mismo.

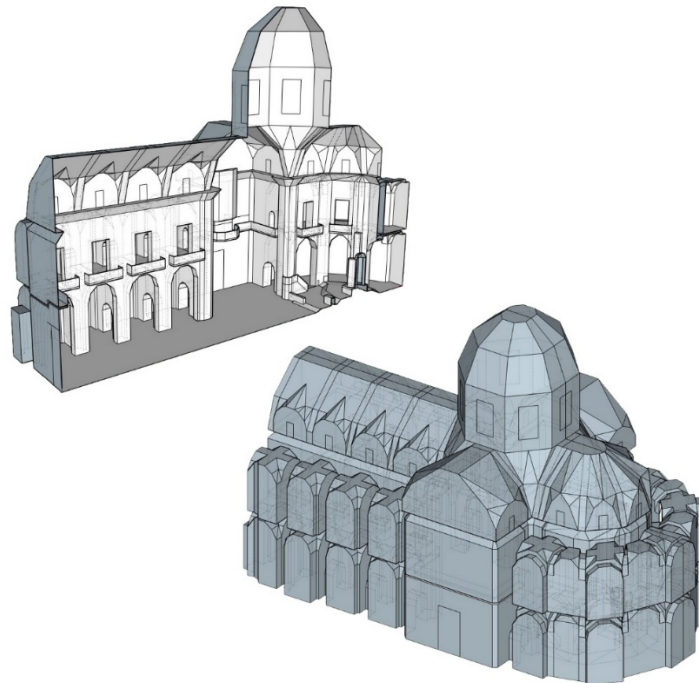


Figura IV.2.1.4. Imágenes del interior y el exterior del modelo acústico de la Basílica.

A partir de la inspección visual contrastada con el análisis de los proyectos de restauración y demás información sobre las obras realizadas en la Basílica a lo largo de su historia y que se detallan en el capítulo II.1, se han diferenciado los materiales incluidos el punto 4.2 del capítulo III a los que se han asignado las propiedades acústicas descritas en ese mismo apartado.

Los catálogos de materiales que incluyen propiedades acústicas se centran en materiales modernos y homogéneos, en su mayoría fabricados industrialmente. Por el contrario los materiales presentes en edificación histórica son en su mayoría tradicionales y naturales, extraídos de zonas próximas a la construcción, y no ensayados en laboratorios mediante procedimientos normalizados. Esto ha supuesto una dificultad considerable al no existir bases de datos de este tipo de materiales y carecer de información sobre su comportamiento desde el punto de vista acústico.

Como ya se ha comentado anteriormente, el material predominante en la Basílica es la fábrica de piedra, presente en muros, pilares y bóvedas y que compone en torno al 80% de las superficies del espacio interior. No existen datos sobre este material por lo que se ha recurrido a estudios similares (Martellotta, 2009; Alonso et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) para disponer de valores de referencia y un orden de magnitud aproximado, a partir de los cuales se han ajustado los coeficientes para ajustar el modelo a las medidas reales.

El segundo material más abundante es el mármol, presente en el pavimento de toda la planta baja y en elementos singulares del ábside como los muretes, los púlpitos y el tabernáculo. El mármol sí está recogido en catálogos y bases de datos de propiedades acústicas, por lo su caracterización ha sido más sencilla. Cabe tener en cuenta que el paso del tiempo y el desgaste podría haber alterado sus propiedades, no obstante, dada la dificultad de analizar este hecho y la escasa superficie que compone, en torno al 8%, respecto a la fábrica de piedra, se han tomado los valores normalizados.

El mobiliario existente, que supone alrededor del 5% del área del modelo, se ha caracterizado a partir de la bibliografía existente y a que diferentes investigadores han realizado estudios específicos en bancos de iglesias.

El resto de materiales representan una parte mínima de la superficie interior de la Basílica, incluyéndose en la tabla las distintas fuentes de las que se han extraído los datos.

Respecto a los coeficientes de dispersión, se han establecido tres niveles de dispersión en función de la irregularidad de las superficies, de acuerdo con investigaciones similares (Alonso et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) que se describen en el mismo apartado de la metodología.

IV.2.1.4. Caracterización acústica de la Basílica para el culto y validez de la simulación

Como se ha explicado en el capítulo II.3 se han clasificado los parámetros estudiados en cuatro grupos: reverberación, energía, inteligibilidad y espacialidad, asociados con las principales cualidades subjetivas de las salas.

IV.2.1.4.1. Parámetros de reverberación

Dado que la reverberación es la persistencia del sonido en la sala una vez cesa la emisión y está relacionada con el grado de vivacidad de la sala, su valor debe adecuarse al uso del recinto ya que no tiene los mismos requerimientos una representación teatral o un discurso verbal que los distintos tipos de música. Para caracterizar la Basílica en lo relativo a su comportamiento reverberante se han analizado los parámetros tiempo de reverberación RT, considerando la caída de 30 dB (T30), y el tiempo de caída inicial EDT.

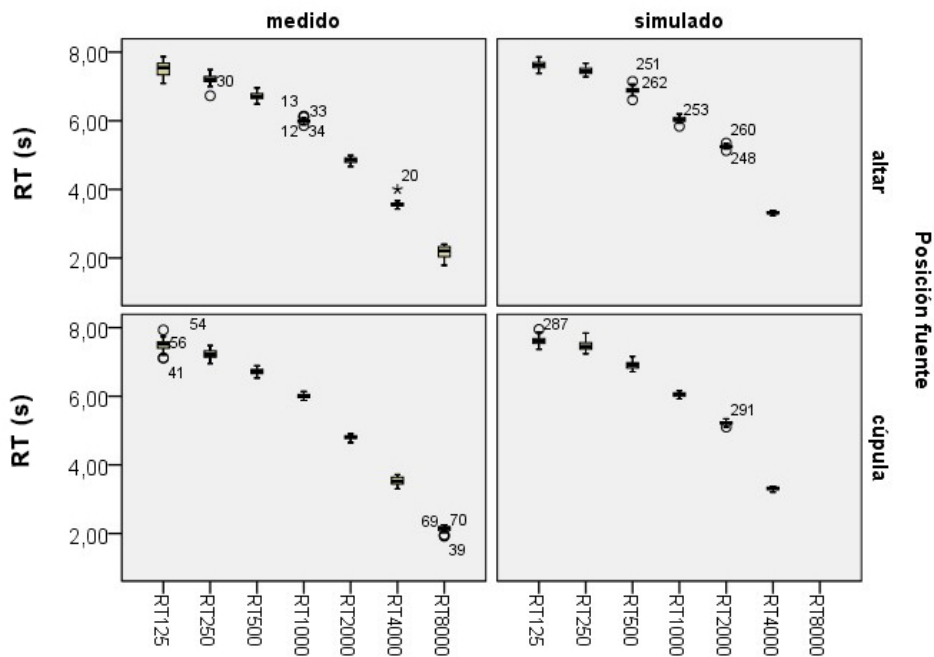


Figura IV.2.1.5. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro RT por frecuencias.

La figura IV.2.1.5 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro T30. Como se observa la dispersión en

general es baja, hay muy poca variabilidad en los valores medidos en unos puntos y en otros para todas las frecuencias.

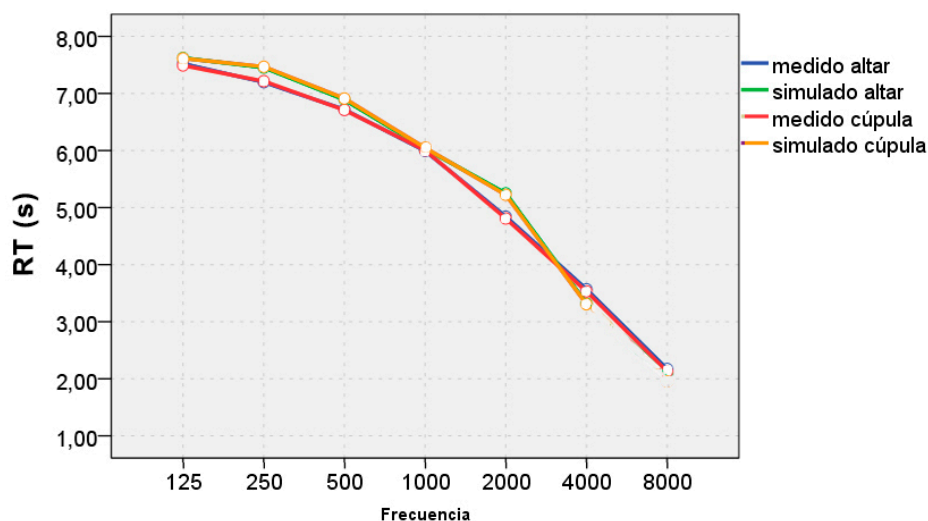


Figura IV.2.1.6. Valores de RT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente, altar y cúpula.

La figura IV.2.1.6 muestra los valores de RT promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, en función de la posición de la fuente: altar y cúpula. Puede observarse que este parámetro no muestra apenas diferencias entre las dos posiciones de la fuente ni entre los valores medidos y simulados, aspectos que se han concretado en el análisis estadístico posterior.

A título ilustrativo se muestran las gráficas por zonas para cada una de las posiciones de fuente y bandas de frecuencia, recogidas en las figuras IV.2.1.7 y IV.2.1.8. Se observa claramente el paralelismo entre los resultados obtenidos por ambas fuentes para todas las frecuencias, y que se comporta de manera muy similar en las tres zonas de recepción estudiadas aunque en general la zona de la nave es la que menores diferencias presenta entre valores medidos y simulados.

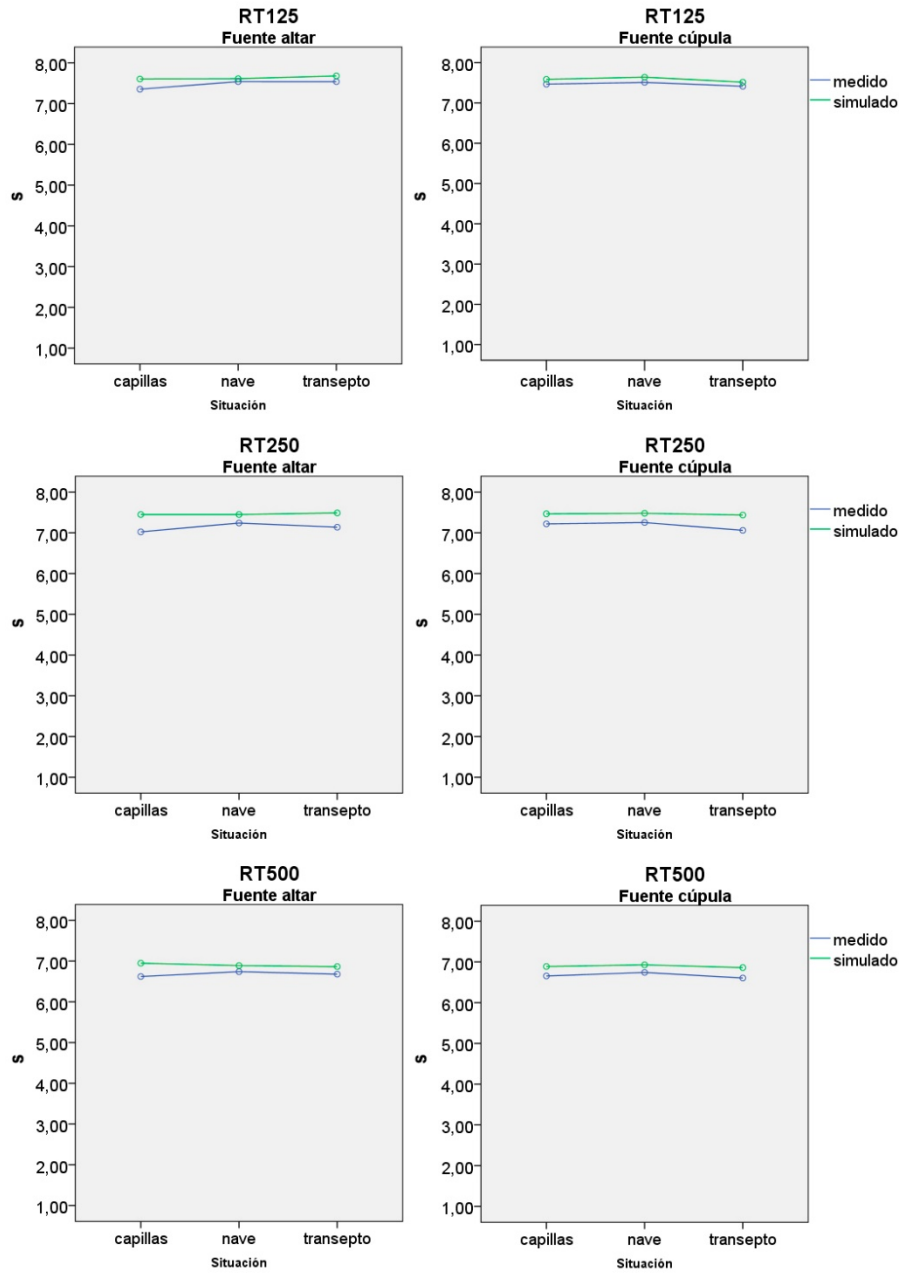


Figura IV.2.1.7. Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

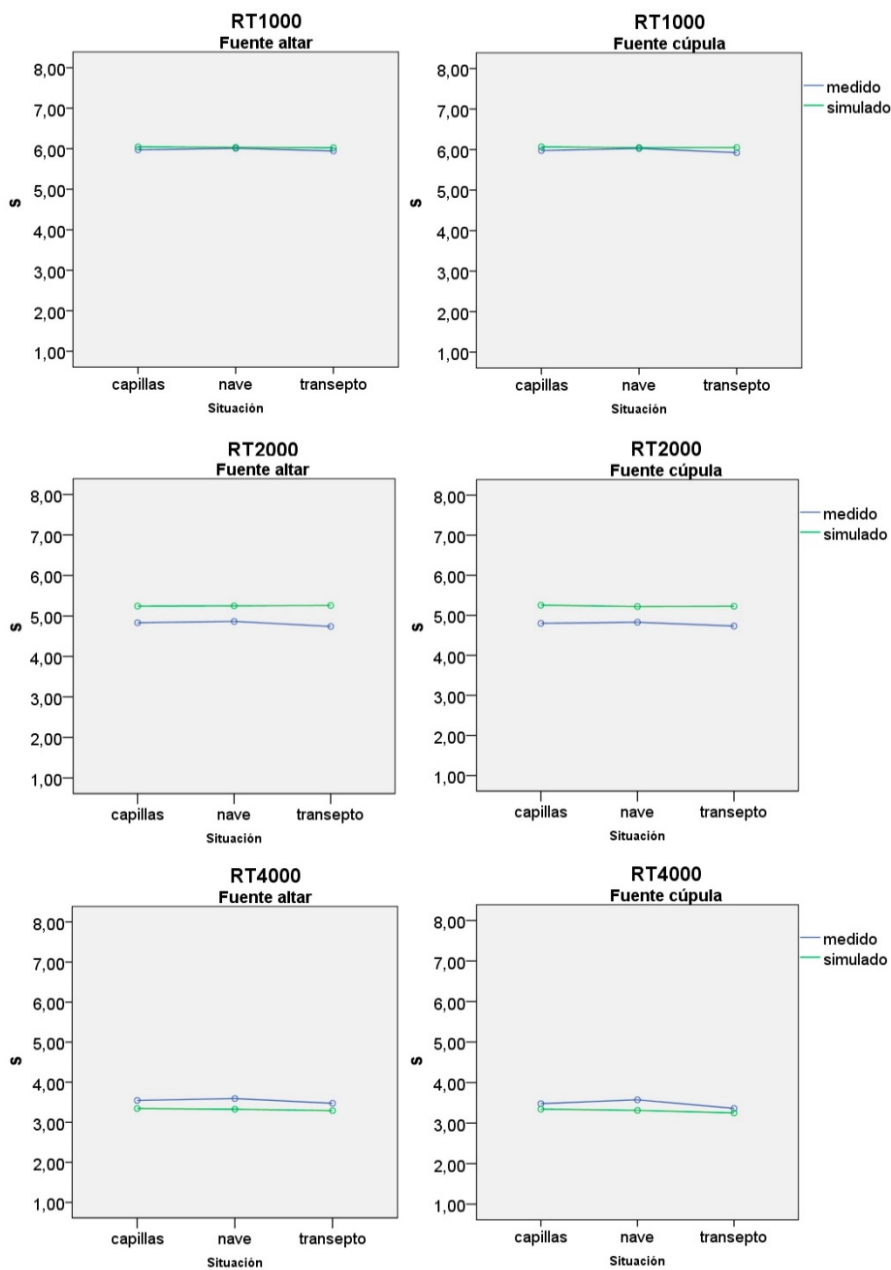


Figura IV.2.1.8. Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

Tabla IV.2.1.3. Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	P	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
RT125	capillas	altar	7,355	7,605	0,083	0,083	-0,113	0,340	0,31	-0,250	0,035	0,68
		cúpula	7,468	7,588	0,083	0,083				-0,120	0,309	0,32
	nave	altar	7,540	7,613	0,032	0,032	0,030	0,508	0,08	-0,072	0,112	0,19
		cúpula	7,510	7,641	0,032	0,032				-0,131	0,004	0,35
	transepto	altar	7,540	7,680	0,068	0,068	0,125	0,195	0,33	-0,140	0,147	0,37
		cúpula	7,415	7,517	0,068	0,068				-0,102	0,291	0,27
RT250	capillas	altar	7,023	7,448	0,058	0,058	-0,195	0,019	0,56	-0,425	<0,001	1,21
		cúpula	7,218	7,465	0,058	0,058				-0,248	0,003	0,69
	nave	altar	7,239	7,448	0,022	0,022	-0,012	0,700	0,03	-0,209	<0,001	0,58
		cúpula	7,251	7,478	0,022	0,022				-0,227	<0,001	0,63
	transepto	altar	7,137	7,487	0,047	0,047	0,077	0,255	0,21	-0,350	<0,001	0,98
		cúpula	7,060	7,435	0,047	0,047				-0,375	<0,001	1,06
RT500	capillas	altar	6,620	6,948	0,046	0,046	-0,035	0,593	0,11	-0,328	<0,001	0,99
		cúpula	6,655	6,888	0,046	0,046				-0,233	0,001	0,70
	nave	altar	6,740	6,889	0,018	0,018	-0,001	0,953	0,00	-0,150	<0,001	0,44
		cúpula	6,741	6,929	0,018	0,018				-0,187	0,113	0,56
	transepto	altar	6,678	6,863	0,038	0,038	0,073	0,172	0,22	-0,185	0,050	0,55
		cúpula	6,605	6,860	0,038	0,038				-0,255	0,171	0,77
RT1000	capillas	altar	5,973	6,045	0,032	0,032	-0,002	0,956	0,01	-0,072	0,311	0,24
		cúpula	5,975	6,065	0,032	0,032				-0,090	0,037	0,30
	nave	altar	6,009	6,033	0,012	0,012	-0,019	0,282	0,06	-0,024	0,001	0,08
		cúpula	6,028	6,046	0,012	0,012				-0,018	<0,001	0,06
	transepto	altar	5,945	6,023	0,026	0,026	0,022	0,560	0,07	-0,078	<0,001	0,26
		cúpula	5,923	6,050	0,026	0,026				-0,127	<0,001	0,43
RT2000	capillas	altar	4,833	5,243	0,026	0,026	0,032	0,372	0,13	-0,410	<0,001	1,70
		cúpula	4,800	5,253	0,026	0,026				-0,453	<0,001	1,89
	nave	altar	4,866	5,249	0,010	0,010	0,039	0,007	0,16	-0,383	<0,001	1,57
		cúpula	4,827	5,219	0,010	0,010				-0,392	<0,001	1,62
	transepto	altar	4,740	5,258	0,021	0,021	0,008	0,779	0,04	-0,518	<0,001	2,19
		cúpula	4,732	5,225	0,021	0,021				-0,493	<0,001	2,09
RT4000	capillas	altar	3,545	3,343	0,033	0,033	0,065	0,168	0,37	0,203	<0,001	1,14
		cúpula	3,480	3,345	0,033	0,033				0,135	0,005	0,78
	nave	altar	3,592	3,324	0,013	0,013	0,017	0,347	0,09	0,268	<0,001	1,49
		cúpula	3,575	3,313	0,013	0,013				0,262	<0,001	1,46
	transepto	altar	3,473	3,290	0,027	0,027	0,112	0,004	0,64	0,183	<0,001	1,06
		cúpula	3,362	3,250	0,027	0,027				0,112	0,004	0,66
RT8000	capillas	altar	2,123		0,084		-0,080	0,502	0,75			
		cúpula	2,203		0,084							
	nave	altar	2,236		0,032		0,094	0,042	0,84			
		cúpula	2,142		0,032							
	transepto	altar	1,912		0,069		-0,103	0,289	1,08			
		cúpula	2,015		0,069							

La tabla IV.2.1.3 muestra la comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación en ambas posiciones de fuente.

En cuanto a la posición de la fuente, hay muy pocos casos en los que exista diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre los valores medidos, sólo ocurre en cuatro casos y en uno de ellos con muy escasa significación, pero a nivel de percepción sólo hay un caso en el que se alcanza una diferencia de 1,08 JND, situado en el transepto y a una frecuencia de 8000 Hz por lo que se puede considerar que para las posiciones de fuente estudiadas no hay diferencia perceptiva.

Situación similar ocurre en cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación. Los resultados obtenidos al comparar los valores medios por zonas del parámetro RT son buenos para todas las posiciones de fuente y receptor estudiadas y todas las frecuencias. Existen mayores diferencias estadísticamente significativas pero a nivel de percepción los resultados muestran que se superan los 2 JND únicamente para la frecuencia de 2000 Hz en el transepto y en una cantidad mínima que podría despreciarse.

Se puede concluir que el parámetro RT tiene un comportamiento muy homogéneo y permite una buena simulación.

El tiempo de reverberación sigue la tendencia habitual en los recintos de culto con valores que casi alcanzan los 7 segundos para las frecuencias más bajas y caen hasta los 2 segundos en las más altas. La evolución del tiempo de reverberación en función de la frecuencia, que cae desde las frecuencias bajas a las altas, es debida a la absorción del gran volumen de aire existente en estos espacios y se acentúa a medida que el tamaño aumenta (De Barrio, 2008).

Los valores obtenidos a frecuencias medias son elevados para el volumen de la Basílica y se asemejan a los de las grandes catedrales españolas como Toledo (Pedrero et al. 2014), Málaga (Álvarez-Morales, 2014) aunque en estos casos el volumen interior supera los 100.000 m³. Tomando como referencia el caso de la Iglesia de Il Gesú, estudiada por Martellota y Álvarez (2014) y de tipología en planta idéntica a Santa María, aunque con unas dimensiones algo superiores, se observa que en Elche es del orden de un segundo superior a todas las frecuencias. Esto puede ser debido al hecho de que en el caso italiano tanto las bóvedas como las paredes cuentan con una rica ornamentación a base de pinturas con una mayor absorción que la piedra vista.

Atendiendo a los usos que se desarrollan en la Basílica y tomando como referencia los valores óptimos incluidos en los ábacos y referencias existentes, los valores de RT son excesivos tanto para el caso de la música de órgano o el canto coral, como para el habla, independientemente de la existencia de apoyo electroacústico (Sendra y Zamarreño, 1996).

No obstante, se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María), estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para el tiempo de reverberación es de un máximo de 8,9 segundos y un mínimo de 3,9 segundos, siendo el valor medio igual a 5,34 segundos por lo que la Basílica de Santa María se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose ligeramente por encima de la media.

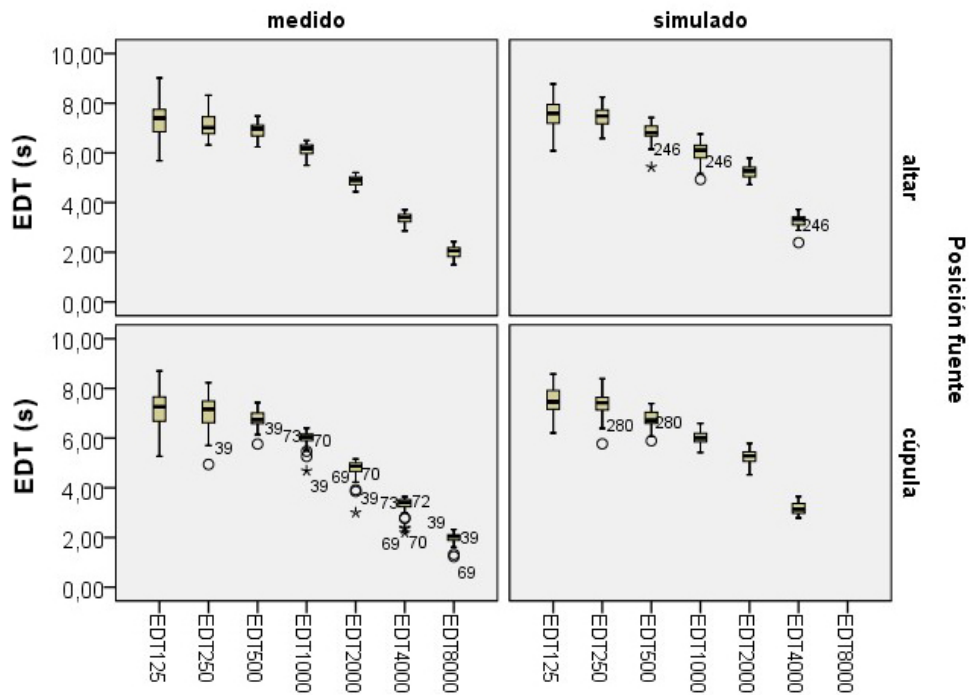


Figura IV.2.1.9. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro EDT por frecuencias.

La figura IV.2.1.9 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro EDT. Al igual que ocurría con el parámetro RT, la dispersión en general es baja y existe muy poca variabilidad en los valores medidos en unos puntos y en otros a frecuencias medias y altas. No obstante, en este caso aumenta a frecuencias bajas y se observan algunos puntos espurios sobre todo a frecuencias altas en los valores medidos con la fuente en la cúpula, aunque se alejan muy poco.

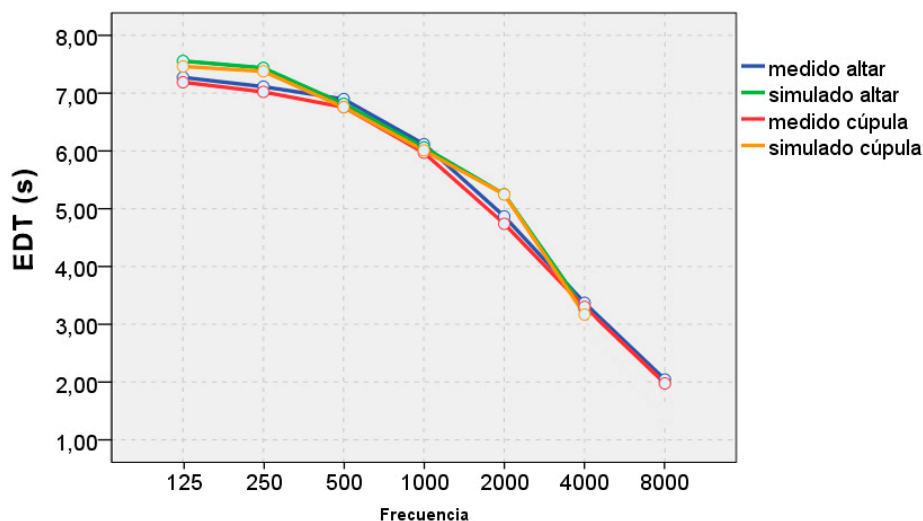


Figura IV.2.1.10. Valores de EDT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.1.10 muestra los valores de EDT promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Puede observarse que, al igual que en el caso anterior, este parámetro no muestra apenas diferencias entre las dos posiciones de la fuente, aunque sí se aprecian ligeras variaciones entre los valores medidos y simulados que se analizarán más adelante.

El EDT sigue la tendencia del tiempo de reverberación, habitual en los recintos de culto, con valores muy similares que se sitúan entre 7 y 8 segundos para las frecuencias más bajas y caen hasta los 2 segundos en las más altas.

En las figuras IV.2.1.11 y IV.2.1.12 se muestran las gráficas por zonas para cada una de las posiciones de fuente y bandas de frecuencia. Se aprecian algunas diferencias entre las zonas estudiadas siendo los valores ligeramente superiores en las capillas y más bajos en el transepto. Se puede comprobar que a frecuencias medias el modelo se encuentra ajustado, encontrando las mayores diferencias desde el punto de vista de la fuente a frecuencias bajas y a 2000 Hz en cuanto a la calibración.

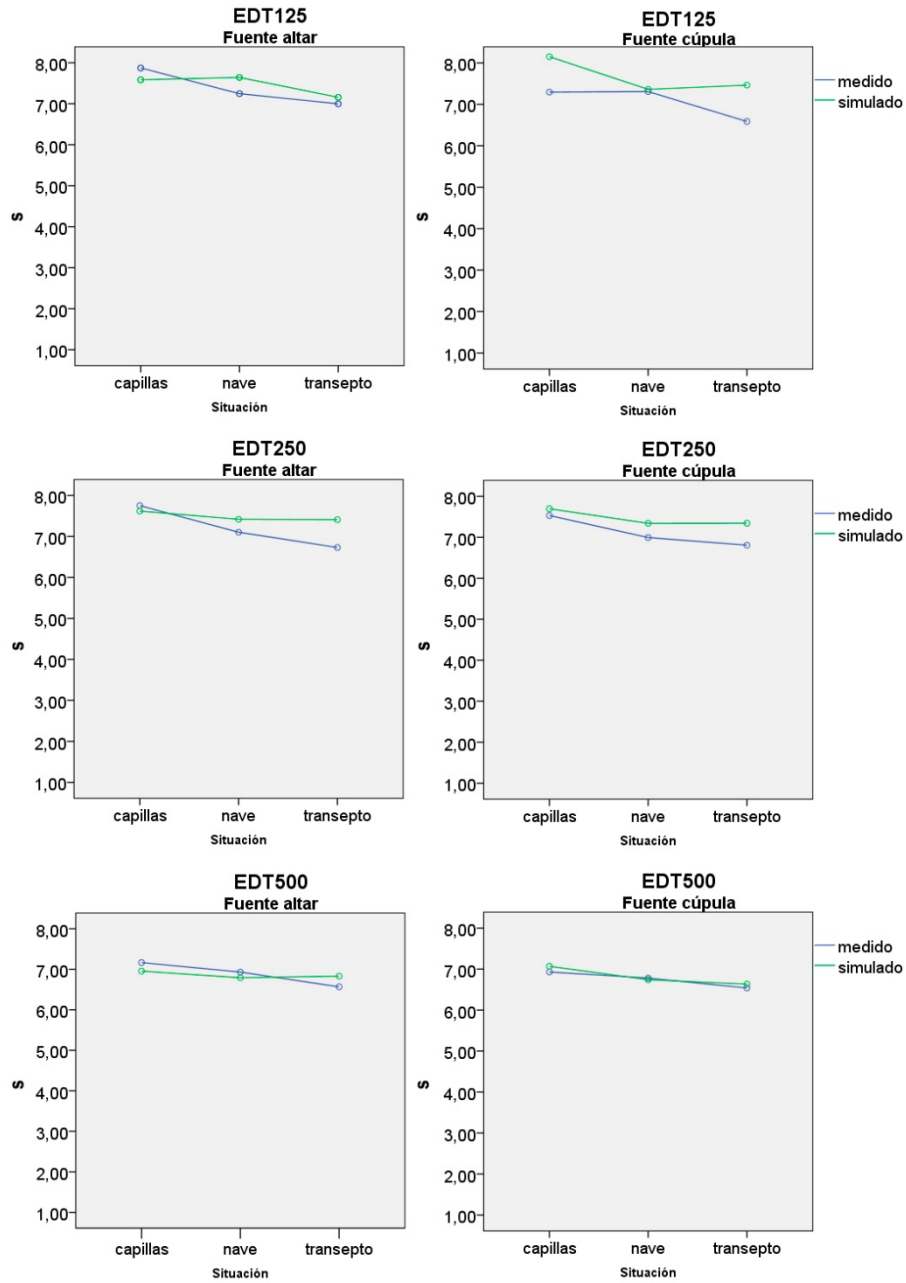


Figura IV.2.1.11. Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

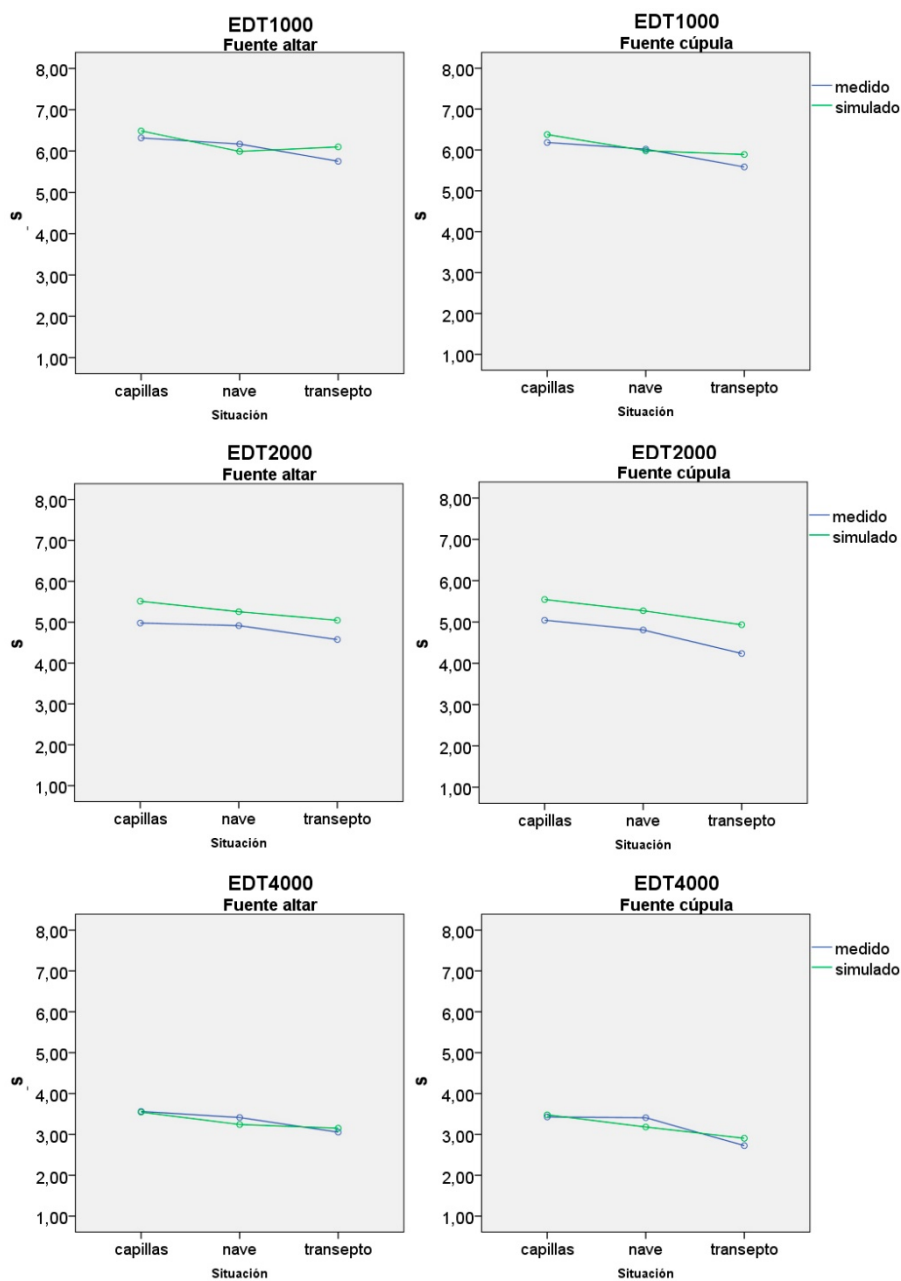


Figura IV.2.1.12. Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.4. Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
EDT125	capillas	altar	7,873	7,583	0,328	0,328	0,578	0,215	1,47	0,290	0,533	0,74
		cúpula	7,295	8,150	0,328	0,328				-0,855	0,068	2,34
	nave	altar	7,246	7,642	0,126	0,126	-0,062	0,730	0,17	-0,396	0,028	1,09
		cúpula	7,307	7,361	0,126	0,126				-0,053	0,766	0,15
	transepto	altar	6,998	7,157	0,268	0,268	0,412	0,279	1,18	-0,158	0,677	0,45
		cúpula	6,587	7,463	0,268	0,268				-0,877	0,022	2,66
EDT250	capillas	altar	7,750	7,618	0,259	0,259	0,220	0,549	0,57	0,133	0,718	0,34
		cúpula	7,530	7,695	0,259	0,259				-0,165	0,653	0,44
	nave	altar	7,102	7,417	0,100	0,100	0,109	0,443	0,31	-0,314	0,028	0,89
		cúpula	6,994	7,339	0,100	0,100				-0,345	0,016	0,99
	transepto	altar	6,730	7,408	0,212	0,212	-0,077	0,798	0,23	-0,678	0,025	2,02
		cúpula	6,807	7,342	0,212	0,212				-0,535	0,076	1,57
EDT500	capillas	altar	7,165	6,955	0,170	0,170	0,235	0,329	0,66	0,210	0,383	0,59
		cúpula	6,930	7,067	0,170	0,170				-0,137	0,567	0,40
	nave	altar	6,931	6,791	0,065	0,065	0,151	0,105	0,43	0,140	0,131	0,41
		cúpula	6,780	6,740	0,065	0,065				0,040	0,663	0,12
	transepto	altar	6,567	6,830	0,139	0,139	0,028	0,885	0,09	-0,263	0,181	0,80
		cúpula	6,538	6,633	0,139	0,139				-0,095	0,628	0,29
EDT1000	capillas	altar	6,318	6,488	0,142	0,142	0,135	0,503	0,43	-0,170	0,399	0,54
		cúpula	6,183	6,378	0,142	0,142				-0,195	0,334	0,63
	nave	altar	6,169	5,989	0,055	0,055	0,148	0,058	0,48	0,179	0,022	0,58
		cúpula	6,020	5,980	0,055	0,055				0,040	0,606	0,13
	transepto	altar	5,752	6,100	0,116	0,116	0,167	0,312	0,58	-0,348	0,036	1,21
		cúpula	5,585	5,890	0,116	0,116				-0,305	0,065	1,09
EDT2000	capillas	altar	4,980	5,513	0,132	0,132	-0,063	0,739	0,25	-0,533	0,008	2,14
		cúpula	5,043	5,543	0,132	0,132				-0,500	<0,001	1,98
	nave	altar	4,916	5,256	0,051	0,051	0,109	0,132	0,44	-0,340	<0,001	1,38
		cúpula	4,807	5,273	0,051	0,051				-0,466	<0,001	1,94
	transepto	altar	4,575	5,047	0,108	0,108	0,338	0,029	1,48	-0,472	0,002	2,06
		cúpula	4,237	4,933	0,108	0,108				-0,697	<0,001	3,29
EDT4000	capillas	altar	3,563	3,545	0,110	0,110	0,135	0,386	0,76	0,018	0,910	0,10
		cúpula	3,428	3,480	0,110	0,110				-0,052	0,735	0,31
	nave	altar	3,413	3,243	0,042	0,042	0,004	0,951	0,02	0,171	0,005	1,00
		cúpula	3,410	3,182	0,042	0,042				0,228	<0,001	1,34
	transepto	altar	3,055	3,152	0,090	0,090	0,330	0,010	2,16	-0,097	0,447	0,63
		cúpula	2,725	2,905	0,090	0,090				-0,180	0,157	1,32
EDT8000	capillas	altar	2,005		0,104		-0,128	0,387	1,27			
		cúpula	2,133		0,104							
	nave	altar	2,124		0,040		0,105	0,065	0,99			
		cúpula	2,019		0,040							
	transepto	altar	1,717		0,085		0,033	0,782	0,39			
		cúpula	1,683		0,085							

La tabla IV.2.1.4 muestra la comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran a frecuencias bajas, sin alcanzar en ningún caso 1 segundo, siendo la máxima diferencia de 0,6 segundos. Las diferencias son mayores en las capillas y el transepto que en la nave.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en un caso, correspondiendo a la zona del transepto, a la frecuencia de 4000 Hz.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND en casos aislados en las capillas y el transepto. Además, se supera ligeramente, por lo que se puede considerar que para las posiciones de fuente estudiadas no hay diferencia.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real, son en general aceptables. En el 84 % de los casos las diferencias entre los valores medidos y simulados están por debajo de los 2 JND. Los mayores valores se encuentran en las capillas y el transepto. A título de ejemplo, la diferencia máxima alcanzada es de 0,877 segundos, con un valor medido de 6,587 segundos, localizado en el transepto a 125 Hz con la fuente en la cúpula. Existe diferencia estadísticamente significativa en un mayor número de casos, destacando las frecuencias de 250 y 2000 Hz en las que se da prácticamente en todas las zonas para ambas posiciones de fuente.

No obstante, al trasladar los resultados a términos de percepción, mejoran. Se superan los 2 JND de diferencia entre valores medidos y simulados únicamente en las capillas y en el transepto en pocos casos y salvo una única excepción para una sola posición de fuente. A frecuencias medias el modelo se encuentra perfectamente ajustado para todas las zonas.

Los resultados obtenidos son similares a los de otros recintos de culto, con una tendencia y valores muy semejantes a los del parámetro RT. Se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares, (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) e estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009). El rango de valores para el tiempo de caída inicial es de un máximo de 8,8 segundos y un mínimo de 4 segundos, siendo el valor medio igual a 5,56 segundos, por lo que la Basílica de Santa María se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose ligeramente por encima de la media.

Los valores de EDT superan de manera considerable el rango óptimo de 2,1 – 4,2 segundos, para música de órgano y canto vocal, establecido por Martellotta (2008) a partir de ensayos subjetivos.

IV.2.1.4.2. Parámetros de energía

Los parámetros energéticos son determinantes para el estudio de la transparencia, relacionada con la intensidad relativa de los sonidos. La transparencia en relación con la audición musical, se refiere a la percepción de tonos separados en el tiempo de instrumentos que están siendo tocados simultáneamente. Es una propiedad en la que influyen de manera importante las primeras reflexiones, reflexiones en las que la trayectoria entre fuente y receptor es corta. La caracterización de las salas de culto desde el punto de vista energético se ha realizado mediante los parámetros de claridad del habla y musical C50 y C80, el tiempo central T_s y la fuerza G .

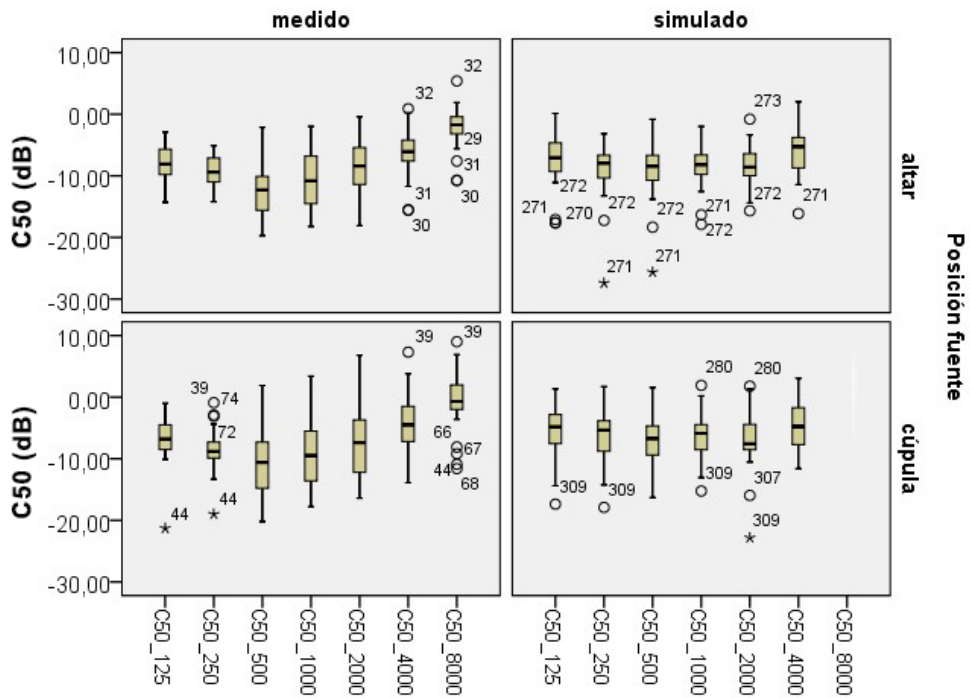


Figura IV.2.1.13. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C50 por frecuencias.

La figura IV.2.1.13 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro C50. En este caso, los valores muestran mayor dispersión, sobre todo a frecuencias medias, y mayor presencia de puntos espurios, especialmente en el caso de la simulación para la fuente en el altar.

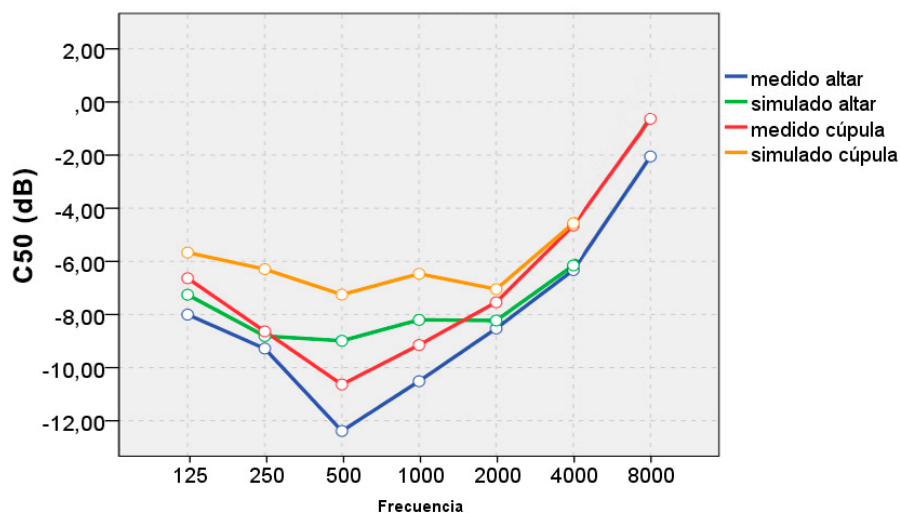


Figura IV.2.1.14. Valores de C50 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.1.14 muestra los valores de C50 promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. A diferencia de lo que ocurría con los parámetros de reverberación, se observan diferencias entre los cuatro casos analizados especialmente a frecuencias medias, mientras que a bajas y altas las líneas se aproximan.

En las figuras IV.2.1.15 y IV.2.1.16 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores de C50 son menores en las capillas a todas las frecuencias. En la nave y el transepto los valores se asemejan, siendo ligeramente superiores en el segundo. Esto sea probablemente debido a que la profundidad de la nave es mayor por lo que los receptores situados en las últimas filas que se encuentran a más distancia de la fuente, provocan un descenso del valor medio en esta zona.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que aunque hay más diferencia que en los parámetros de reverberación, la tendencia es muy similar en ambos casos.

En cuanto a la calibración, cabe destacar a frecuencias bajas la zona de las capillas es la peor ajustada mientras que a medias y altas se aproxima. En el caso de la zona de la nave la diferencia se mantiene constante a frecuencias bajas y medias y mejora en a altas, mientras que el transepto muestra buenos resultados en todos los casos.

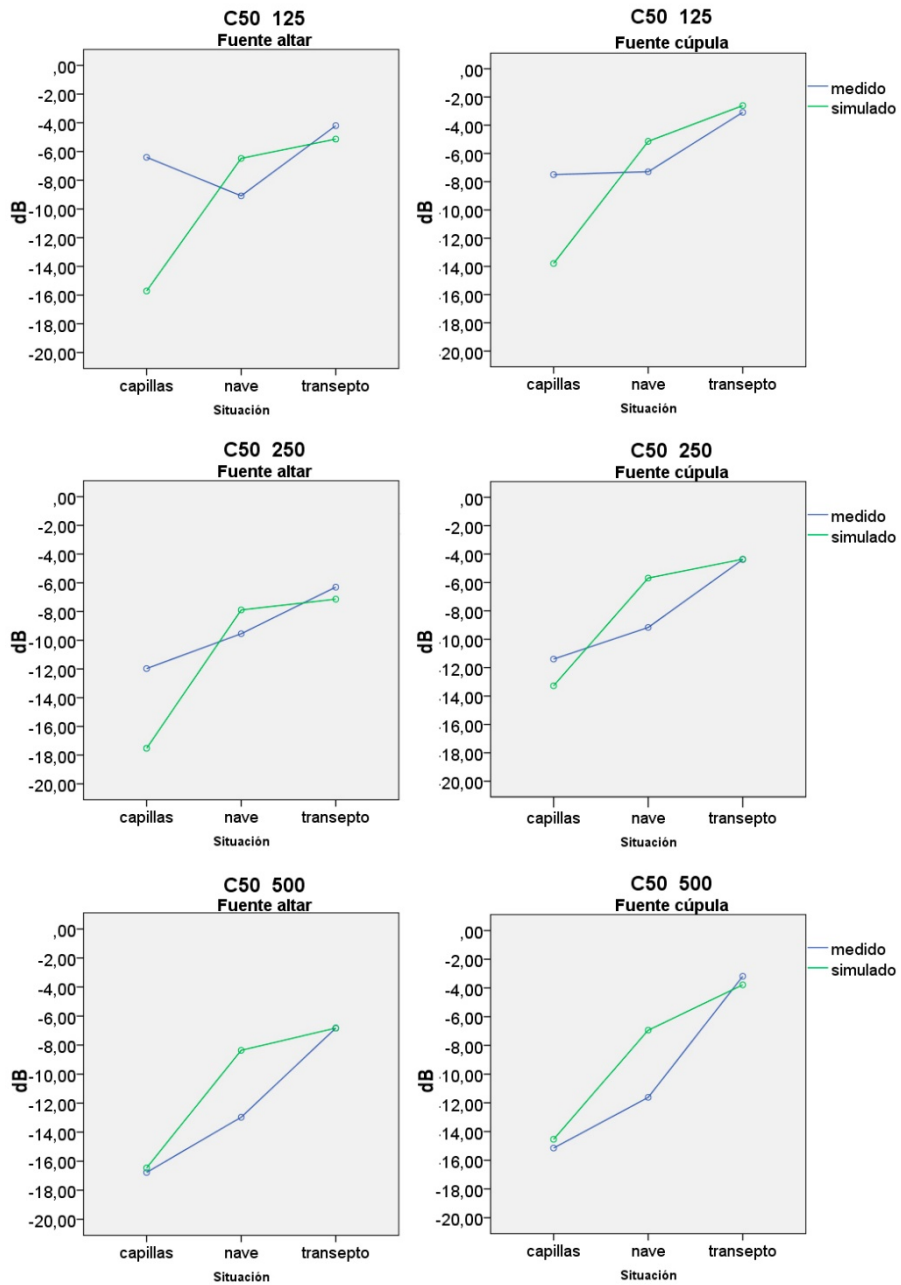


Figura IV.2.1.15. Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

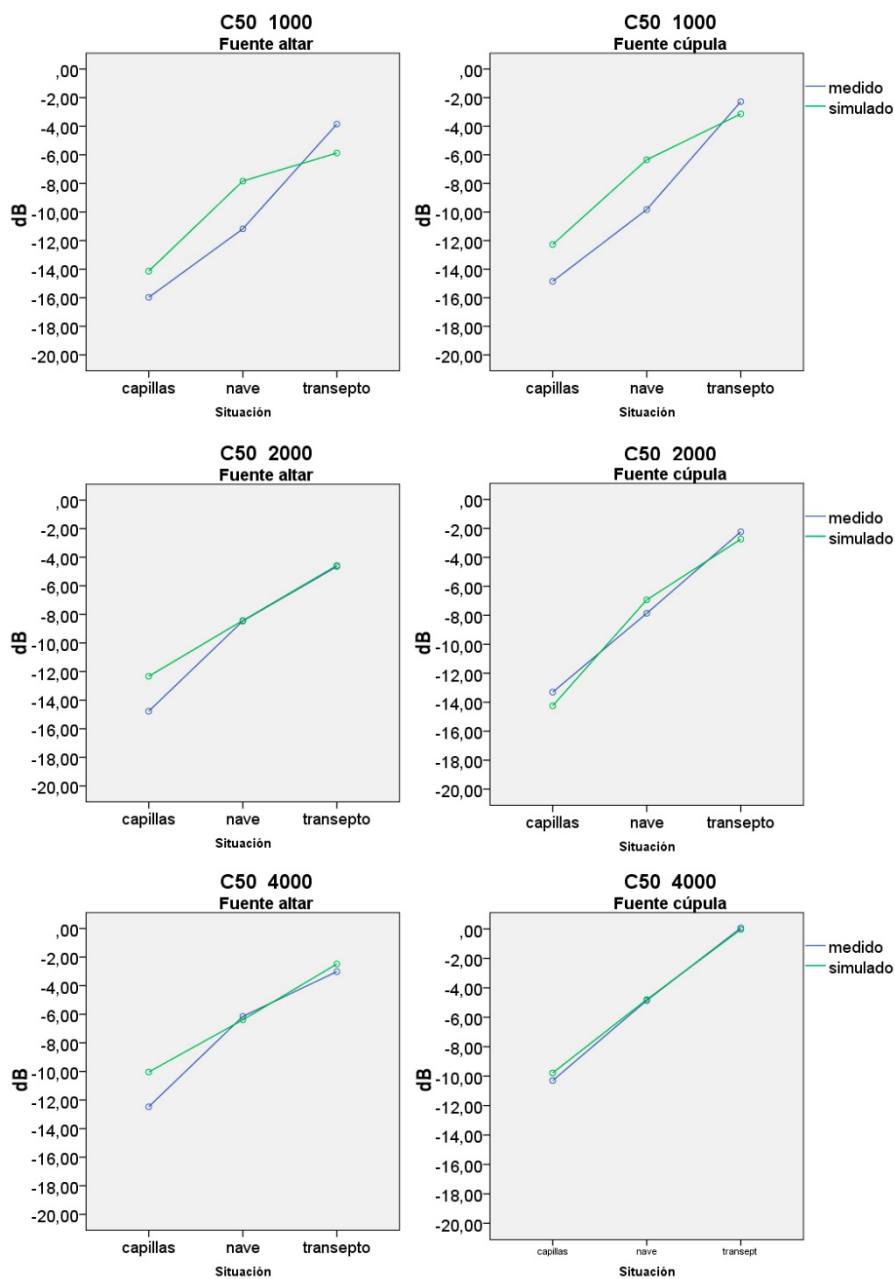


Figura IV.2.1.16. Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.5. Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
C50_125	capillas	altar	-6,400	-15,715	1,424	1,424	1,100	0,586	0,73	9,315	<0,001	6,21
		cúpula	-7,500	-13,795	1,424	1,424				6,295	0,002	4,20
	nave	altar	-9,085	-6,475	0,548	0,548	-1,789	0,023	1,19	-2,610	0,001	1,74
		cúpula	-7,296	-5,142	0,548	0,548				-2,154	0,006	1,44
	transeptoo	altar	-4,200	-5,133	1,163	1,163	-1,117	0,498	0,74	0,933	0,571	0,62
		cúpula	-3,083	-2,607	1,163	1,163				-0,477	0,772	0,32
C50_250	capillas	altar	-11,975	-17,525	1,326	1,326	-0,575	0,760	0,38	5,550	0,004	3,70
		cúpula	-11,400	-13,278	1,326	1,326				1,878	0,318	1,25
	nave	altar	-9,544	-7,892	0,510	0,510	-0,378	0,601	0,25	-1,652	0,024	1,10
		cúpula	-9,167	-5,689	0,510	0,510				-3,478	<0,001	2,32
	transeptoo	altar	-6,300	-7,138	1,082	1,082	-1,917	0,213	1,28	0,838	0,585	0,56
		cúpula	-4,383	-4,358	1,082	1,082				-0,025	0,987	0,02
C50_500	capillas	altar	-16,775	-16,465	1,692	1,692	-1,625	0,498	1,08	-0,310	0,897	0,21
		cúpula	-15,150	-14,543	1,692	1,692				-0,608	0,800	0,41
	nave	altar	-12,970	-8,362	0,651	0,651	-1,348	0,146	0,90	-4,609	<0,001	3,07
		cúpula	-11,622	-6,941	0,651	0,651				-4,681	<0,001	3,12
	transeptoo	altar	-6,833	-6,828	1,382	1,382	-3,650	0,064	2,43	-0,005	0,998	0,00
		cúpula	-3,183	-3,783	1,382	1,382				0,600	0,759	0,40
C50_1000	capillas	altar	-15,975	-14,138	1,670	1,670	-1,125	0,635	0,75	-1,838	0,438	1,23
		cúpula	-14,850	-12,273	1,670	1,670				-2,578	0,277	1,72
	nave	altar	-11,181	-7,837	0,643	0,643	-1,352	0,139	0,90	-3,344	<0,001	2,23
		cúpula	-9,830	-6,346	0,643	0,643				-3,484	<0,001	2,32
	transeptoo	altar	-3,850	-5,875	1,364	1,364	-1,567	0,418	1,04	2,025	0,296	1,35
		cúpula	-2,283	-3,140	1,364	1,364				0,857	0,658	0,57
C50_2000	capillas	altar	-14,775	-12,333	1,714	1,714	-1,475	0,544	0,98	-2,443	0,315	1,63
		cúpula	-13,300	-14,250	1,714	1,714				0,950	0,696	0,63
	nave	altar	-8,463	-8,428	0,660	0,660	-0,600	0,521	0,40	-0,035	0,970	0,02
		cúpula	-7,863	-6,933	0,660	0,660				-0,930	0,321	0,62
	transeptoo	altar	-4,650	-4,575	1,399	1,399	-2,417	0,224	1,61	-0,075	0,970	0,05
		cúpula	-2,233	-2,742	1,399	1,399				0,508	0,798	0,34
C50_4000	capillas	altar	-12,475	-10,043	1,592	1,592	-2,175	0,336	1,45	-2,433	0,282	1,62
		cúpula	-10,300	-9,782	1,592	1,592				-0,518	0,819	0,35
	nave	altar	-6,152	-6,393	0,613	0,613	-1,293	0,138	0,86	0,241	0,781	0,16
		cúpula	-4,859	-4,797	0,613	0,613				-0,063	0,943	0,04
	transeptoo	altar	-3,017	-2,480	1,300	1,300	-3,083	0,096	2,06	-0,537	0,771	0,36
		cúpula	0,067	-0,035	1,300	1,300				0,102	0,956	0,07
C50_8000	capillas	altar	-7,825		1,370		0,375	0,847	0,25			
		cúpula	-8,200		1,370							
	nave	altar	-2,052		0,527		-1,781	0,018	1,19			
		cúpula	-0,270		0,527							
	transeptoo	altar	1,800		1,119		-1,000	0,528	0,67			
		cúpula	2,800		1,119							

La tabla IV.2.1.5 muestra la comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias superan los 3 dB y se encuentran en el transepto. En el resto de casos, se sitúan en su mayoría en valores entre 1 y 1,5 dB.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos, correspondiendo a la nave a 125 y 8000 Hz.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND en casi todas las frecuencias en la zona del transepto, mientras que en la nave y las capillas sólo en casos aislados, por lo que se puede determinar que el transepto es la zona en la que más influye la ubicación de la fuente para las dos posiciones estudiadas, probablemente debido a la proximidad de los receptores con las mismas.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real varían mucho con la zona y la frecuencia. A frecuencias bajas se observan grandes diferencias en las capillas llegando a los 9 dB, diferencias medias en la nave en torno a los 2 dB y muy poca variación en el transepto. A frecuencias medias la diferencia en las capillas disminuye, encontrando las principales discordancias en la nave con valores de unos 3 dB. A frecuencias altas la zona de las capillas vuelve a ser la menos ajustada con diferencias de alrededor de 2 dB.

Existe diferencia estadísticamente significativa a frecuencias bajas en las capillas y a medias en la nave.

En términos de percepción, es en esos mismos casos en los que se superan los 2 JND. A frecuencias bajas en las capillas se obtienen los peores resultados, con variaciones de casi 4 a 6 JND. A frecuencias medias los problemas de ajuste se concentran en la zona de la nave y no son excesivos, con valores alrededor de los 3 JND a 500 Hz y en torno a los 2,3 a 1000 Hz. Valores que según algunos autores podrían darse por válidos al no superar los 3 JNDs (Álvarez-Morales, 2016). En un 78% de los casos las diferencias entre valores medidos y simulados están por debajo de los 2 JND.

Los valores obtenidos son similares a los de la iglesia de Il Gesú, de geometría y dimensiones similares, en la que se midió un valor medio de C50 de -11 dB (Martellota, 2014), e inferiores a los obtenidos en iglesias con volúmenes que cuadruplican el de la Basílica (Álvarez-Morales et al., 2014).

El parámetro C50 mide la proporción efectiva de las primeras reflexiones para la palabra y hace referencia a la capacidad de discriminar adecuadamente las sílabas en una palabra. Se considera que la claridad es excelente cuando el valor es superior a 7 dB, buena cuando se encuentra entre 2 y 7 dB, aceptable cuando está entre -2 y 2 dB, pobre para valores entre -7 y -2 dB y mala cuando es inferior a -7 dB (Barba, 2016).

Los valores obtenidos en la Basílica se situán en torno a -15 dB en las capillas, -11 dB en la nave y -3dB en el transepto a frecuencias medias. La claridad del sonido es por tanto mala en las dos primeras zonas y pobre en el transepto dado que, como se ha comentado anteriormente, la reverberación es alta y la inteligibilidad mala, por lo que será difícil la comprensión del habla siendo necesario un sistema de refuerzo de sonido.

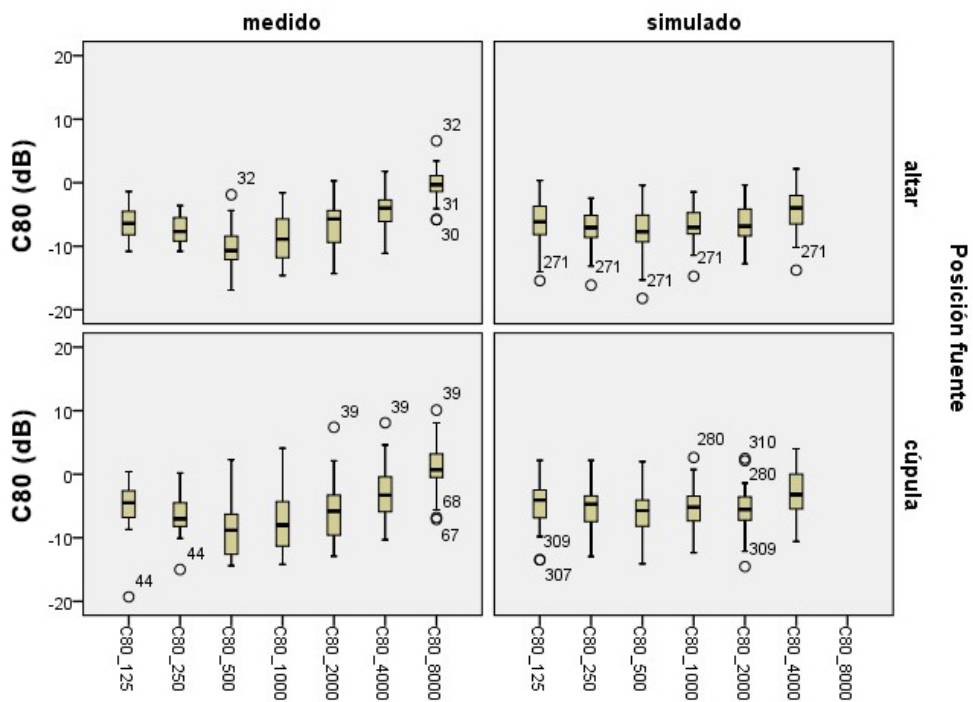


Figura IV.2.1.17. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C80 por frecuencias.

La figura IV.2.1.17 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro C80. El comportamiento es muy similar al del parámetro C50, los valores muestran mayor dispersión que en el caso de los parámetros de reverberación, sobre todo a frecuencias medias. Existen algunos puntos es purios pero son casos aislados y que no difieren excesivamente de la tendencia generalizada.

La figura IV.2.1.18 muestra los valores de C80 promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. A diferencia de lo que ocurría con los parámetros de reverberación, se observan diferencias entre los cuatro casos analizados especialmente a 500 Hz, mientras que a bajas y altas frecuencias las líneas se aproximan.

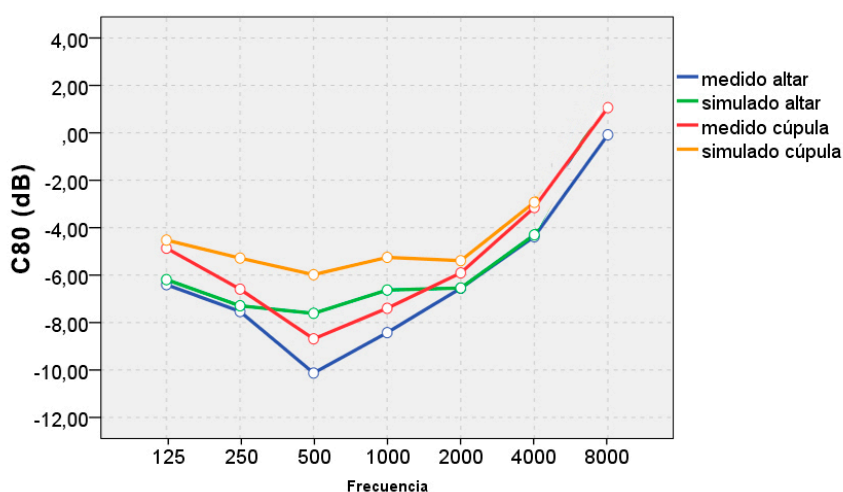


Figura IV.2.1.18. Valores de C80 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

En las figuras IV.2.1.19 y IV.2.1.20 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Al igual que en el caso anterior, los valores de C80 son menores en las capillas a todas las frecuencias. En la nave y el transepto los valores se asemejan, siendo ligeramente superiores en el segundo. Esto sea probablemente debido a que la profundidad de la nave es mayor por lo que los receptores situados en las últimas filas que se encuentran a más distancia de la fuente, provocan un descenso del valor medio en esta zona.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo en ambos casos.

En cuanto a la calibración, cabe destacar a frecuencias bajas la zona de las capillas es la peor ajustada mientras que a medias y altas se obtienen buenos resultados. En el caso de la zona de la nave la diferencia se mantiene constante a frecuencias bajas y medias y mejora en a altas, mientras que el transepto muestra buenos resultados en todos los casos.

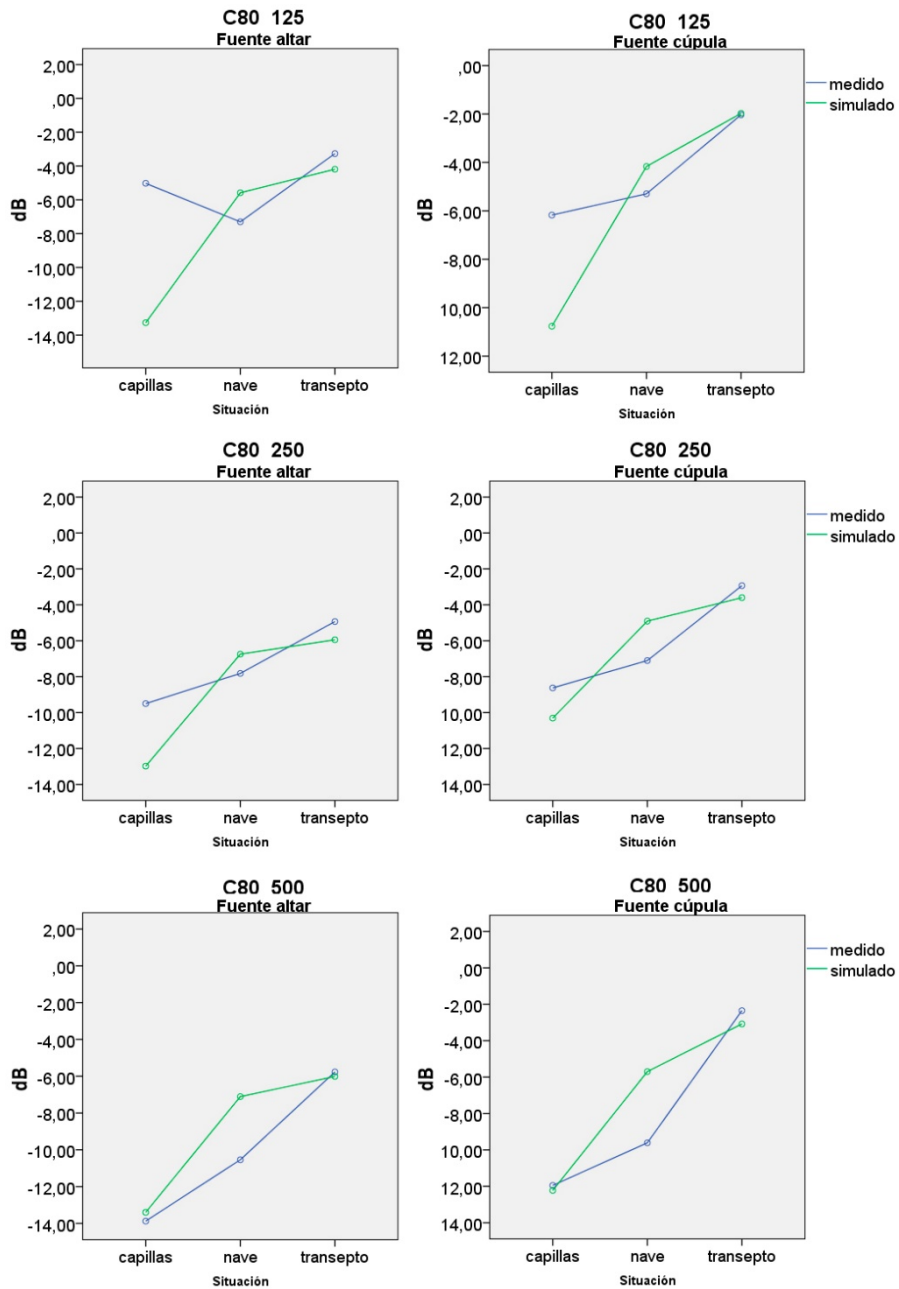


Figura IV.2.1.19. Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

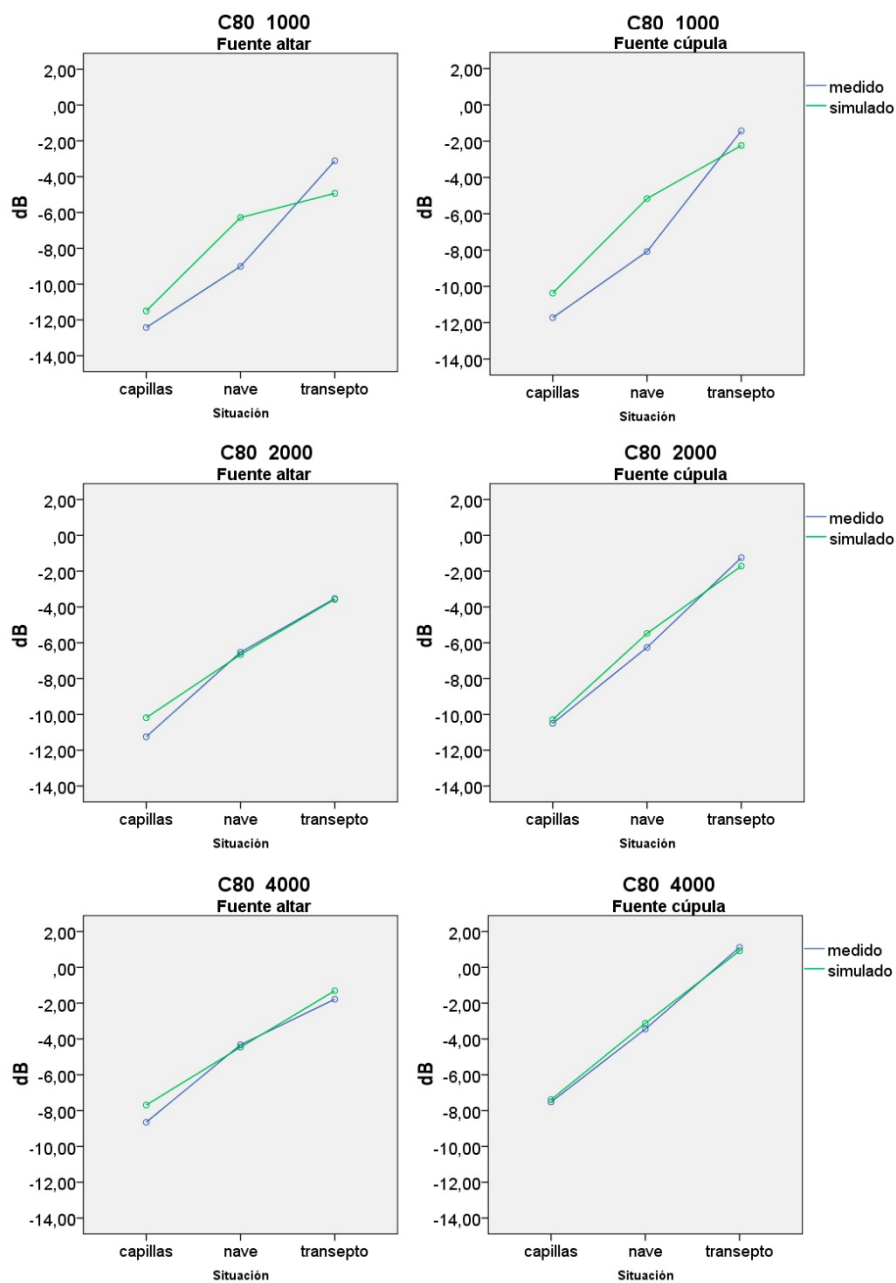


Figura IV.2.1.20. Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.6. Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
C80_125	capillas	altar	-5,025	-13,270	1,333	1,333				8,245	<0,001	5,50
		cúpula	-6,175	-10,768	1,333	1,333	1,150	0,543	0,77	4,593	0,016	3,06
	nave	altar	-7,304	-5,583	0,513	0,513				-1,721	0,019	1,15
		cúpula	-5,296	-4,167	0,513	0,513	-2,007	0,006	1,34	-1,129	0,122	0,75
	transepto	altar	-3,267	-4,192	1,089	1,089				0,925	0,549	0,62
		cúpula	-2,033	-1,972	1,089	1,089	-1,233	0,424	0,82	-0,062	0,968	0,04
C80_250	capillas	altar	-9,500	-12,980	1,103	1,103				3,480	0,027	2,32
		cúpula	-8,625	-10,308	1,103	1,103	-0,875	0,576	0,58	1,683	0,282	1,12
	nave	altar	-7,819	-6,748	0,424	0,424				-1,070	0,077	0,71
		cúpula	-7,104	-4,908	0,424	0,424	-0,715	0,236	0,48	-2,196	<0,001	1,46
	transepto	altar	-4,933	-5,947	0,900	0,900				1,013	0,427	0,68
		cúpula	-2,933	-3,603	0,900	0,900	-2,000	0,119	1,33	0,670	0,600	0,45
C80_500	capillas	altar	-13,875	-13,398	1,432	1,432				-0,477	0,814	0,32
		cúpula	-11,950	-12,228	1,432	1,432	-1,925	0,344	1,28	0,278	0,891	0,19
	nave	altar	-10,541	-7,110	0,551	0,551				-3,431	<0,001	2,29
		cúpula	-9,611	-5,699	0,551	0,551	-0,930	0,235	0,62	-3,912	<0,001	2,61
	transepto	altar	-5,767	-6,010	1,170	1,170				0,243	0,883	0,16
		cúpula	-2,350	-3,080	1,170	1,170	-3,417	0,041	2,28	0,730	0,660	0,49
C80_1000	capillas	altar	-12,425	-11,500	1,477	1,477				-0,925	0,659	0,62
		cúpula	-11,725	-10,370	1,477	1,477	-0,700	0,738	0,47	-1,355	0,518	0,90
	nave	altar	-9,011	-6,282	0,569	0,569				-2,729	0,001	1,82
		cúpula	-8,081	-5,164	0,569	0,569	-0,930	0,250	0,62	-2,918	<0,001	1,95
	transepto	altar	-3,117	-4,932	1,206	1,206				1,815	0,289	1,21
		cúpula	-1,433	-2,237	1,206	1,206	-1,683	0,326	1,12	0,803	0,638	0,54
C80_2000	capillas	altar	-11,250	-10,185	1,484	1,484				-1,065	0,613	0,71
		cúpula	-10,500	-10,293	1,484	1,484	-0,750	0,721	0,50	-0,208	0,921	0,14
	nave	altar	-6,530	-6,663	0,571	0,571				0,133	0,869	0,09
		cúpula	-6,259	-5,478	0,571	0,571	-0,270	0,738	0,18	-0,781	0,335	0,52
	transepto	altar	-3,533	-3,577	1,211	1,211				0,043	0,980	0,03
		cúpula	-1,250	-1,720	1,211	1,211	-2,283	0,185	1,52	0,470	0,784	0,31
C80_4000	capillas	altar	-8,650	-7,693	1,463	1,463				-0,958	0,644	0,64
		cúpula	-7,525	-7,390	1,463	1,463	-1,125	0,588	0,75	-0,135	0,948	0,09
	nave	altar	-4,326	-4,464	0,563	0,563				0,138	0,863	0,09
		cúpula	-3,448	-3,124	0,563	0,563	-0,878	0,272	0,59	-0,324	0,685	0,22
	transepto	altar	-1,783	-1,310	1,195	1,195				-0,473	0,780	0,32
		cúpula	1,117	,917	1,195	1,195	-2,900	0,088	1,93	0,200	0,906	0,13
C80_8000	capillas	altar	-4,000		1,251							
		cúpula	-4,850		1,251		0,850	0,632	0,57			
	nave	altar	-,215		0,482							
		cúpula	1,237		0,482		-1,452	0,035	0,97			
	transepto	altar	3,133		1,022							
		cúpula	4,217		1,022		-1,083	0,455	0,72			

La tabla IV.2.1.6 muestra la comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran siempre en el transepto, excepto para 125 Hz que es mayor en la nave, alcanzándose el valor máximo de 3,4 dB a 500 Hz para un valor medido de 5,7 dB.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos y con muy escasa significación.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND en casi todas las frecuencias en la zona del transepto, mientras que en la nave y en las capillas sólo en un caso, por lo que se puede determinar que el transepto es la zona en la que más influye la posición de la fuente para las dos posiciones estudiadas, probablemente debido a la proximidad de los receptores con las mismas como ya se ha comentado.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real, son en general aceptables. Destacan las diferencias de 4 y 8 dB para la zona de las capillas a 125Hz, al aumentar la frecuencia las diferencias disminuyen, situándose en torno a 2-3 dB en los peores casos y no superando el valor de 1dB en ninguna de las zonas a partir de 2000 Hz.

Existe diferencia estadísticamente significativa a frecuencias bajas en las capillas y a bajas y medias en la nave.

En términos de percepción, se superan los 2 JND en cinco casos de los 36 estudiados, por lo que el 86% de los casos los resultados son buenos. A frecuencias bajas en las capillas se obtienen los peores resultados, con variaciones de casi 4 a 8 JND. A frecuencias medias los problemas de ajuste se concentran en la zona de la nave y no son excesivos, con valores máximos alrededor de 2,5 JND a 500 Hz.

Se han comparado los valores obtenidos con los de 16 iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para la claridad musical es de un máximo de -5,2 dB y un mínimo de -9,9 dB, siendo el valor medio igual a -7,27 dB. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro C80 en la Basílica tiene valores elevados aunque se encuentran dentro de los habituales para este tipo de espacios.

La claridad es por tanto muy baja tanto para el habla como para la música, coincidiendo con la de recintos de dimensiones mucho mayores.

La dificultad de ajustar los valores simulados a frecuencias medias es habitual en estudios similares para los parámetros de claridad, aproximándose siempre

más a las frecuencias bajas y altas (Álvarez-Morales et al. 2011; Alonso et al. 2014).

El parámetro C80 evalúa el grado de separación que se puede apreciar entre los distintos sonidos de una composición musical. Los valores recomendados dependen del tipo de música, aceptándose comúnmente valores comprendidos entre -4 y 4 dB, aunque se recomiendan márgenes más estrictos, entre -2 y 2 dB (Barba, 2016). Según Beranek los valores de C80 cuando la sala está vacía debe encontrarse entre -4 y 0 dB.

En el caso de la Basílica, los valores medios de C80 obtenidos se encuentran en torno a los -12dB en las capillas, -9 dB en la nave y -3 dB en el transepto. El transepto es, por tanto la única de las tres zonas en la que se puede considerar que existe una claridad adecuada para la música.

Es conocido que los parámetros energéticos varían con la distancia a la fuente. Los parámetros C50 y C80 tienen una correlación con la distancia en torno a 0,6 en todos los casos, que se recoge en la tabla IV.2.1.7 y a modo ilustrativo en las figuras IV.2.1.21 y IV.2.1.22 para la frecuencia de 1000 Hz.

Tabla IV.2.1.7. Correlación de los parámetros C50 y C80 con la distancia por bandas de frecuencia. En todos los casos existe diferencia estadísticamente significativa con $p < 0,001$.

Parámetro	Correlación	Parámetro	Correlación
C50_125	-0,598	C80_125	-0,601
C50_250	-0,590	C80_250	-0,638
C50_500	-0,616	C80_500	-0,628
C50_1000	-0,667	C80_1000	-0,657
C50_2000	-0,564	C80_2000	-0,576
C50_4000	-0,640	C80_4000	-0,638
C50_8000	-0,661	C80_8000	-0,682

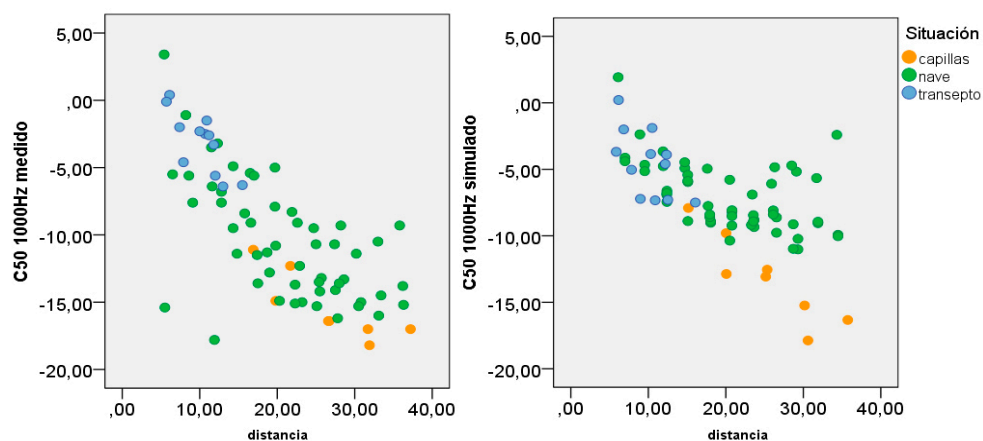


Figura IV.2.1.21. Correlación del parámetro C50 con la distancia a 1000Hz por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.

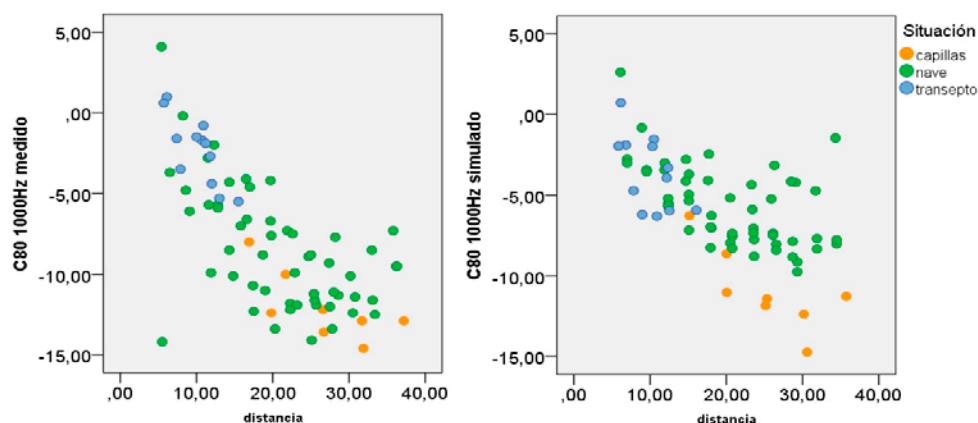


Figura IV.2.1.22. Correlación del parámetro C80 con la distancia a 1000Hz por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.

Los resultados muestran que la simulación de los parámetros C50 y C80 se ve también influida por la distancia a la fuente, ya que a medida que el receptor se aleja de ella los valores se ajustan menos a los reales en el caso de la nave, aunque se mantienen similares en las capillas.

Hasta 20 metros de distancia el valor de los parámetros disminuye conforme ésta aumenta, manteniéndose constante a distancias mayores entre fuente y receptor

La figura IV.2.1.23 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro T_s . Los valores muestran un grado de dispersión similar a los parámetros de energía ya estudiados. Existen algunos puntos espurios pero son casos aislados y que no difieren excesivamente de la tendencia generalizada.

La figura IV.2.1.24 muestra los valores de T_s promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. En este caso, se observan algunas diferencias a frecuencias bajas entre los resultados obtenidos con una fuente y con otra. A 500 Hz se encuentra la mayor diferencia entre medidas y simulación para las dos posiciones de fuente y a medida que aumenta la frecuencia los resultados de los cuatro casos homogeneizan su comportamiento.

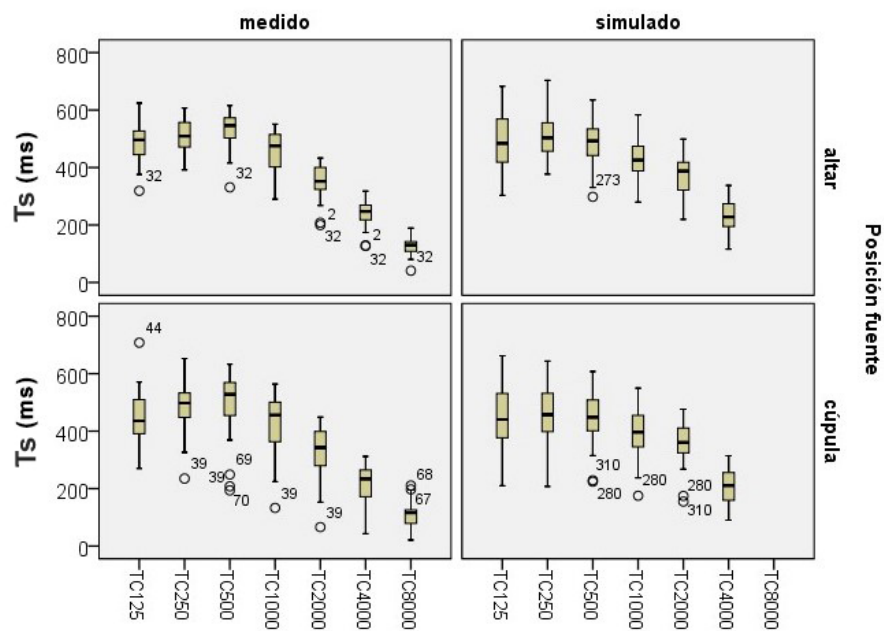


Figura IV.2.1.23. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro T_s por frecuencias.

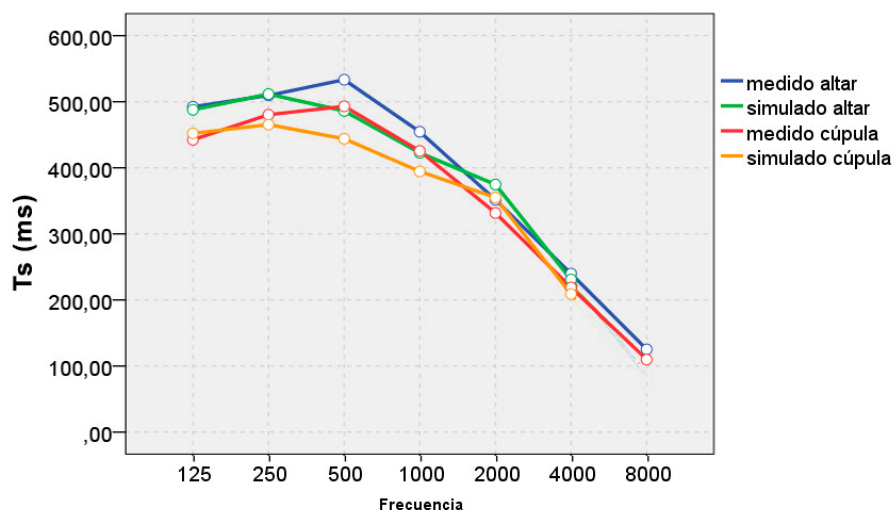


Figura IV.2.1.24. Valores de Ts promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La tendencia es similar a la de los parámetros RT y EDT con un ligero ascenso en los valores con la frecuencia hasta alcanzar máximos en torno a 500 ms a 500 Hz para después caer hasta los 100 ms a 8000 Hz.

En las figuras IV.2.1.25 y IV.2.1.26 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de las capillas son superiores al resto, la nave presenta valores intermedios, mientras que en el transepto se encuentran los más bajos. Esto sucede para todas las frecuencias en las dos posiciones de fuente.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo en ambos casos.

En cuanto a la calibración, cabe destacar que la zona de las capillas a 125 Hz es la peor ajustada mientras que a medias y altas se obtienen buenos resultados. En el caso de la zona de la nave la diferencia es pequeña a frecuencias bajas, algo superior a medias y mejora en las altas, mientras que el transepto la diferencia se mantiene más o menos constante a todas las frecuencias.

La tabla IV.2.1.8 muestra la comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia

de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran siempre en el transepto, con un máximo de 90 ms para un valor medido de 440 ms. Las capillas experimentan las menores variaciones con un máximo de 20 ms a 500 Hz. La nave tiene un comportamiento intermedio, las diferencias son del orden de 20-30 ms en casi todos los casos.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos, correspondiendo con la zona del transepto, y con escasa significación.

A nivel de percepción, las diferencias son mínimas y no superan en ningún caso el valor de 1 JND por lo que se puede considerar que para las posiciones de fuente estudiadas no hay diferencia.

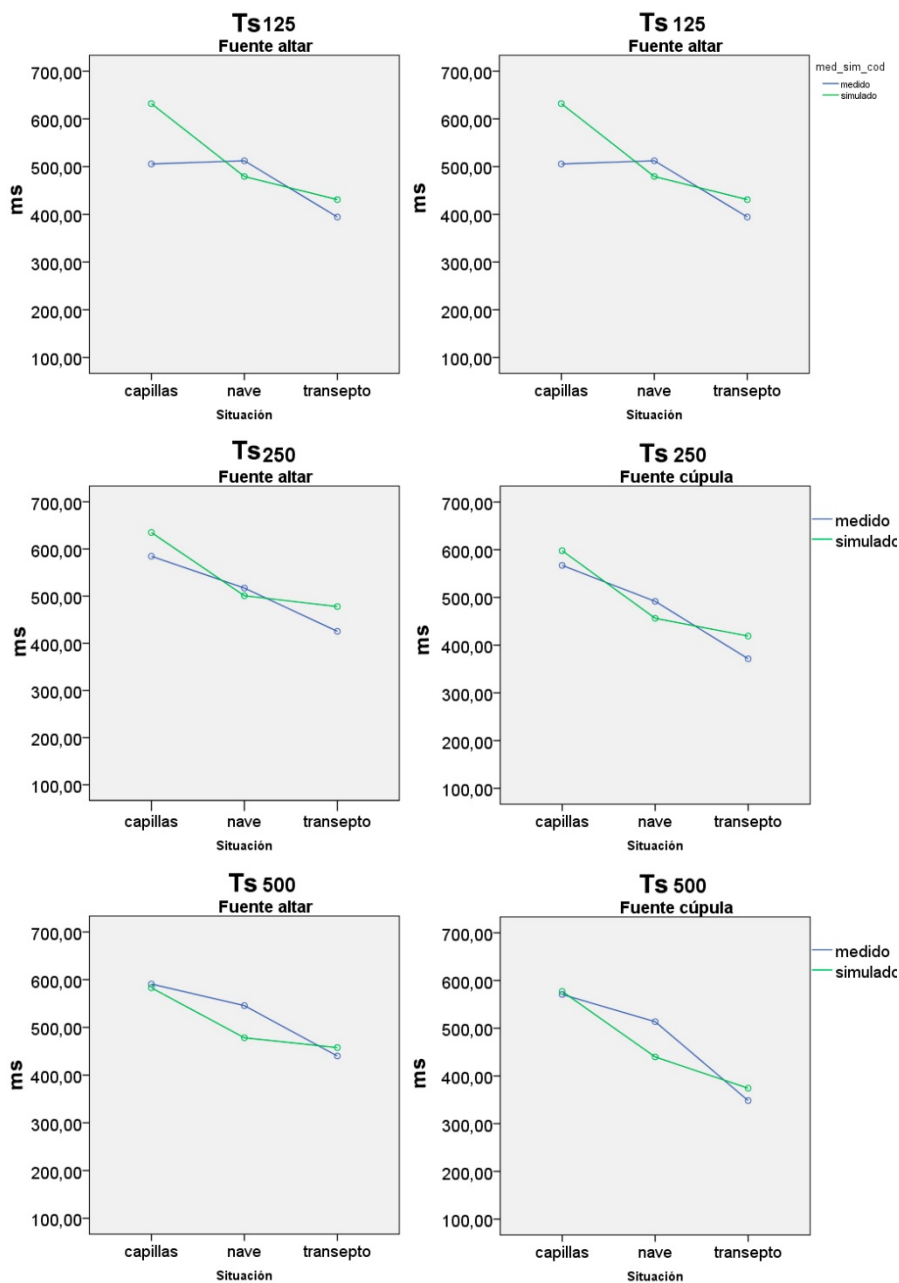


Figura IV.2.1.25. Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

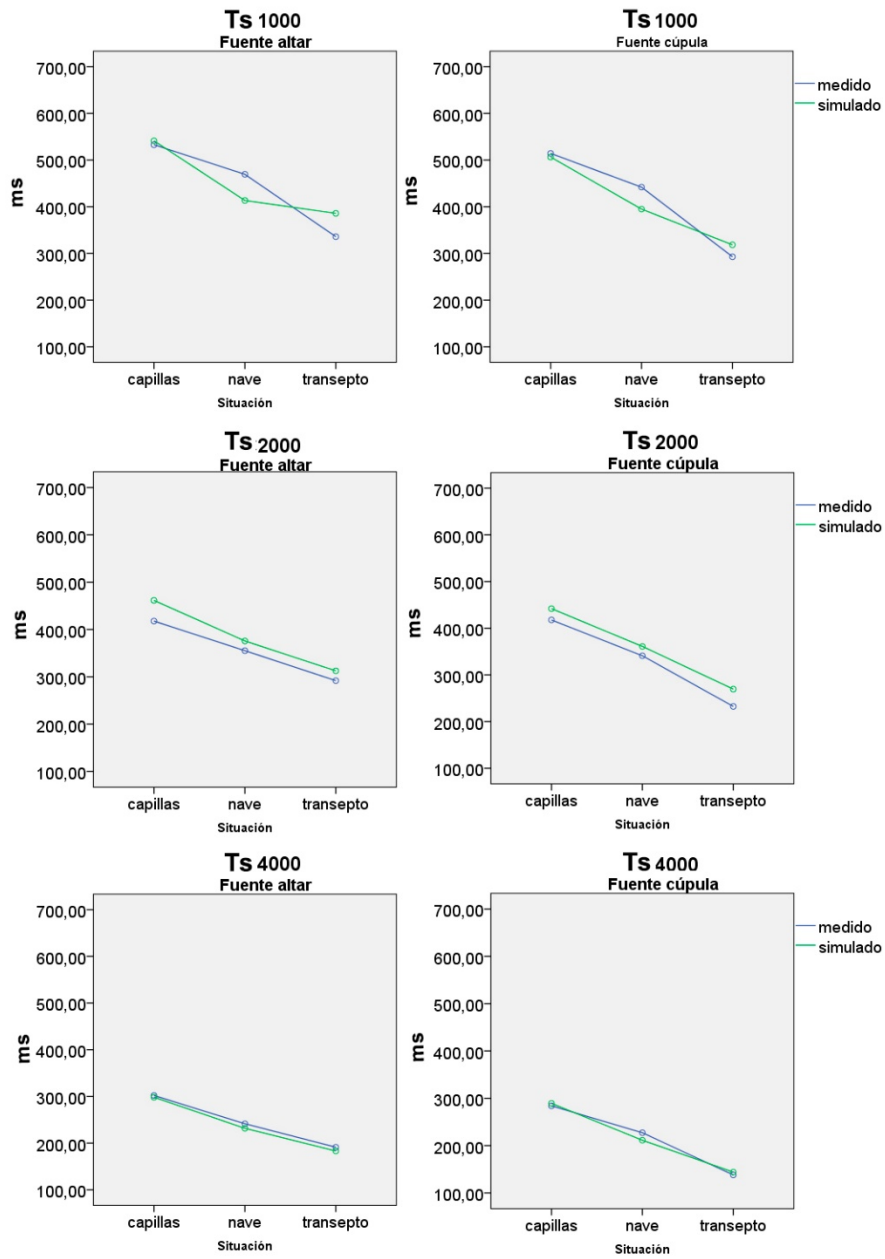


Figura IV.2.1.26. Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.8. Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
Ts125	capillas	altar	505,500	631,985	38,878	38,878	18,750	0,734	0,04	-126,49	0,023	0,29
		cúpula	486,750	620,108	38,878	38,878				-133,36	0,017	0,32
	nave	altar	512,259	479,170	14,964	14,964	49,926	0,020	0,11	33,09	0,120	0,08
		cúpula	462,333	443,692	14,964	14,964				18,64	0,380	0,05
	transepto	altar	394,333	430,752	31,744	31,744	70,667	0,118	0,21	-36,42	0,419	0,11
		cúpula	323,667	378,285	31,744	31,744				-54,62	0,226	0,20
Ts250	capillas	altar	584,500	635,013	32,551	32,551	17,500	0,704	0,04	-50,51	0,274	0,10
		cúpula	567,000	597,790	32,551	32,551				-30,79	0,274	0,06
	nave	altar	517,111	500,776	12,529	12,529	25,370	0,154	0,06	16,33	0,505	0,04
		cúpula	491,741	456,104	12,529	12,529				35,64	0,358	0,09
	transepto	altar	425,333	477,803	26,578	26,578	54,000	0,153	0,15	-52,47	0,046	0,15
		cúpula	371,333	419,047	26,578	26,578				-47,71	0,165	0,15
Ts500	capillas	altar	590,750	582,858	34,201	34,201	20,000	0,680	0,04	7,89	0,206	0,02
		cúpula	570,750	577,053	34,201	34,201				-6,30	0,871	0,01
	nave	altar	545,556	478,157	13,164	13,164	31,815	0,090	0,07	67,40	0,897	0,15
		cúpula	513,741	439,777	13,164	13,164				73,96	<0,001	0,17
	transepto	altar	440,000	457,598	27,925	27,925	91,667	0,022	0,25	-17,60	0,657	0,05
		cúpula	348,333	374,232	27,925	27,925				-25,90	0,513	0,09
Ts1000	capillas	altar	532,750	541,208	33,641	33,641	18,500	0,698	0,04	-8,46	0,859	0,02
		cúpula	514,250	506,373	33,641	33,641				7,88	0,869	0,02
	nave	altar	469,444	413,363	12,948	12,948	27,519	0,135	0,07	56,08	0,003	0,14
		cúpula	441,926	394,881	12,948	12,948				47,05	0,011	0,13
	transepto	altar	335,833	385,822	27,467	27,467	43,000	0,270	0,15	-49,99	0,200	0,18
		cúpula	292,833	318,447	27,467	27,467				-25,61	0,511	0,10
Ts2000	capillas	altar	417,750	461,505	29,406	29,406	0,000	1,000	0,00	-43,76	0,295	0,12
		cúpula	417,750	442,015	29,406	29,406				-24,27	0,561	0,07
	nave	altar	355,185	375,740	11,318	11,318	14,222	0,376	0,05	-20,56	0,201	0,07
		cúpula	340,963	361,056	11,318	11,318				-20,09	0,212	0,07
	transepto	altar	291,833	312,612	24,010	24,010	59,333	0,083	0,24	-20,78	0,542	0,08
		cúpula	232,500	269,563	24,010	24,010				-37,06	0,277	0,19
Ts4000	capillas	altar	302,000	298,210	23,106	23,106	18,000	0,583	0,07	3,79	0,908	0,01
		cúpula	284,000	289,260	23,106	23,106				-5,26	0,872	0,02
	nave	altar	241,444	231,639	8,894	8,894	14,222	0,260	0,07	9,81	0,437	0,05
		cúpula	227,222	211,360	8,894	8,894				15,86	0,209	0,08
	transepto	altar	191,167	183,047	18,866	18,866	53,167	0,048	0,33	8,12	0,761	0,05
		cúpula	138,000	143,943	18,866	18,866				-5,94	0,824	0,05
Ts8000	capillas	altar	170,750		13,425		-11,000	0,563	0,08			
		cúpula	181,750		13,425							
	nave	altar	128,704		5,167		20,963	0,005	0,19			
		cúpula	107,741		5,167							
	transepto	altar	79,167		10,961		7,000	0,652	0,10			
		cúpula	72,167		10,961							

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son también pequeñas. Los mayores valores se encuentran en las capillas a 125 Hz con un valor de máximo de 133 ms.

Existe diferencia estadísticamente significativa en seis casos de los 36 estudiados, destacando la zona de la nave a frecuencias medias.

No obstante, al trasladar los resultados a términos de percepción los resultados son buenos ya que no se superan los 2 JND de diferencia en ningún caso, por lo que se puede considerar que el modelo se encuentra bien calibrado en lo referente al parámetro T_s para todas las zonas y frecuencias.

El tiempo central es el tiempo en milisegundos en el cual el nivel de energía integrado antes de ese momento es igual a la energía recibida después de él. Un tiempo central corto va asociado a una mayor claridad mientras que si es largo supone una nitidez menor y mayor reverberación.

Se ha comparado los valores obtenidos con los de cinco iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para el tiempo central es de un máximo de 368,9 ms y un mínimo de 277,8 ms, siendo el valor medio igual a 332,34 ms. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro T_s en la Basílica tiene valores elevados que se encuentran por encima de los habituales en este tipo de espacios, por tanto la nitidez del sonido será inferior a la de otros espacios similares.

El último de los parámetros ergéticos estudiados corresponde a la fuerza sonora G . La figura IV.2.1.27 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro G . El diagrama de cajas muestra que existe muy poca variabilidad en los valores de este parámetro para todas las frecuencias. Existen varios puntos espurios entre los que destaca el número 40 para la posición de la fuente en la cúpula, que se distancia considerablemente del resto. Dado que este punto sólo presenta un comportamiento anómalo en este parámetro, se puede determinar que no es debido a un error en la medida sino a una causa que afecta exclusivamente al parámetro G .

Por otra parte, se observa la idealización que realiza la simulación que se traduce en la ausencia de puntos espurios.

La figura IV.2.1.28 muestra los valores de G promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa un distanciamiento entre los valores medidos y simulados. Las dos líneas correspondientes a las medidas son prácticamente paralelas entre sí y lo mismo ocurre con las dos que representan las simulaciones. Además las de las medidas se encuentran desplazadas entre sí en torno a 3 dB. Se aprecian por tanto diferencias para las dos variables estudiadas.

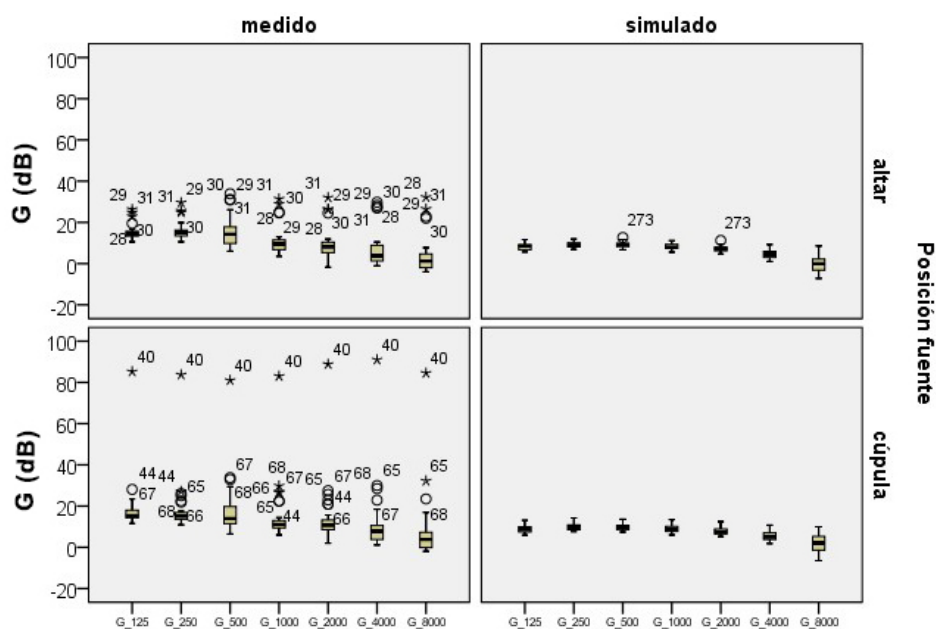


Figura IV.2.1.27. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro G por frecuencias.

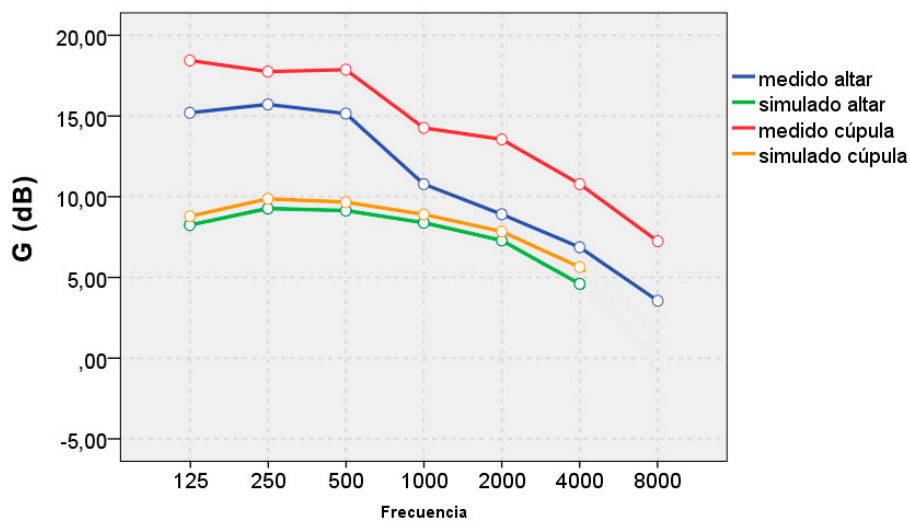


Figura IV.2.1.28. Valores de G promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

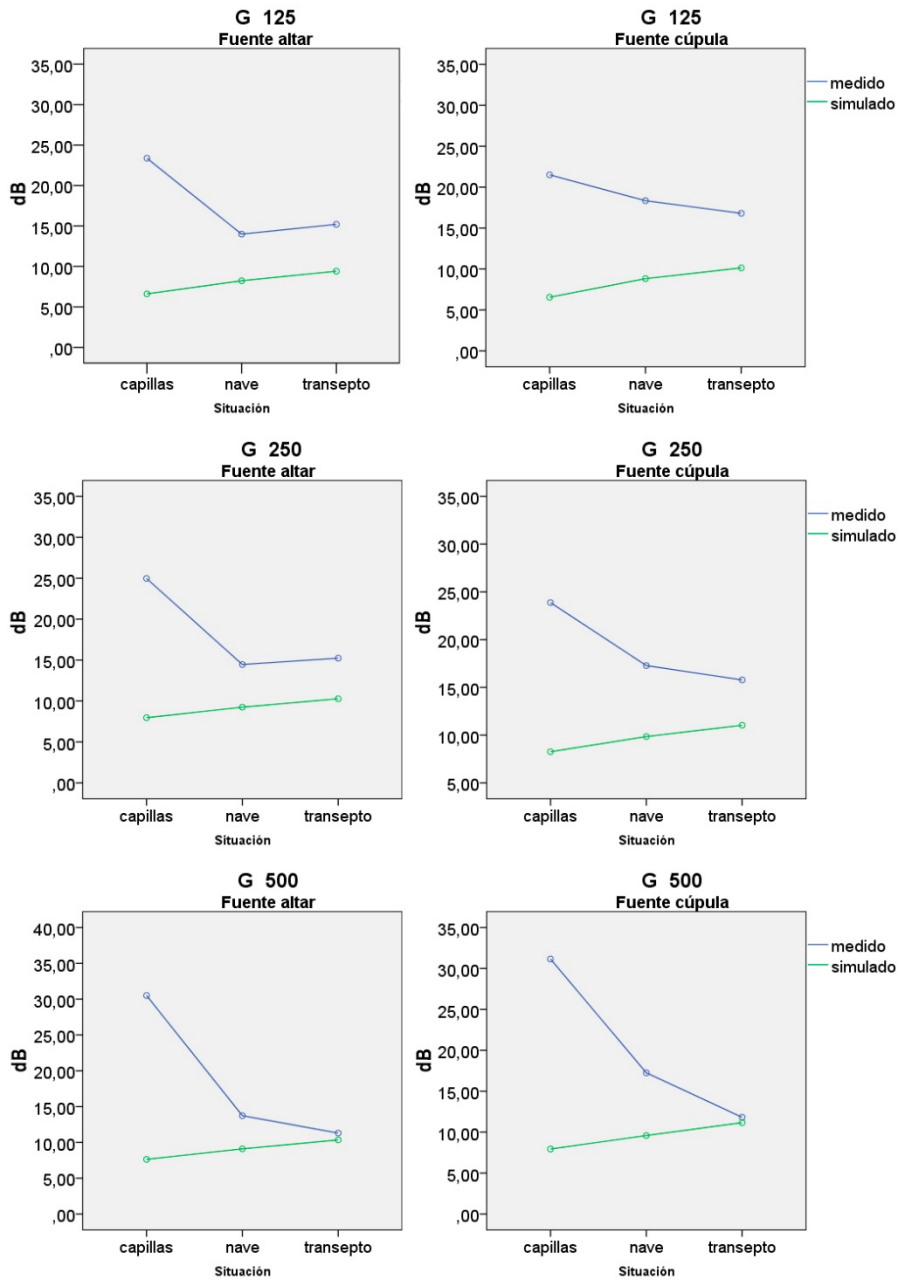


Figura IV.2.1.29. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

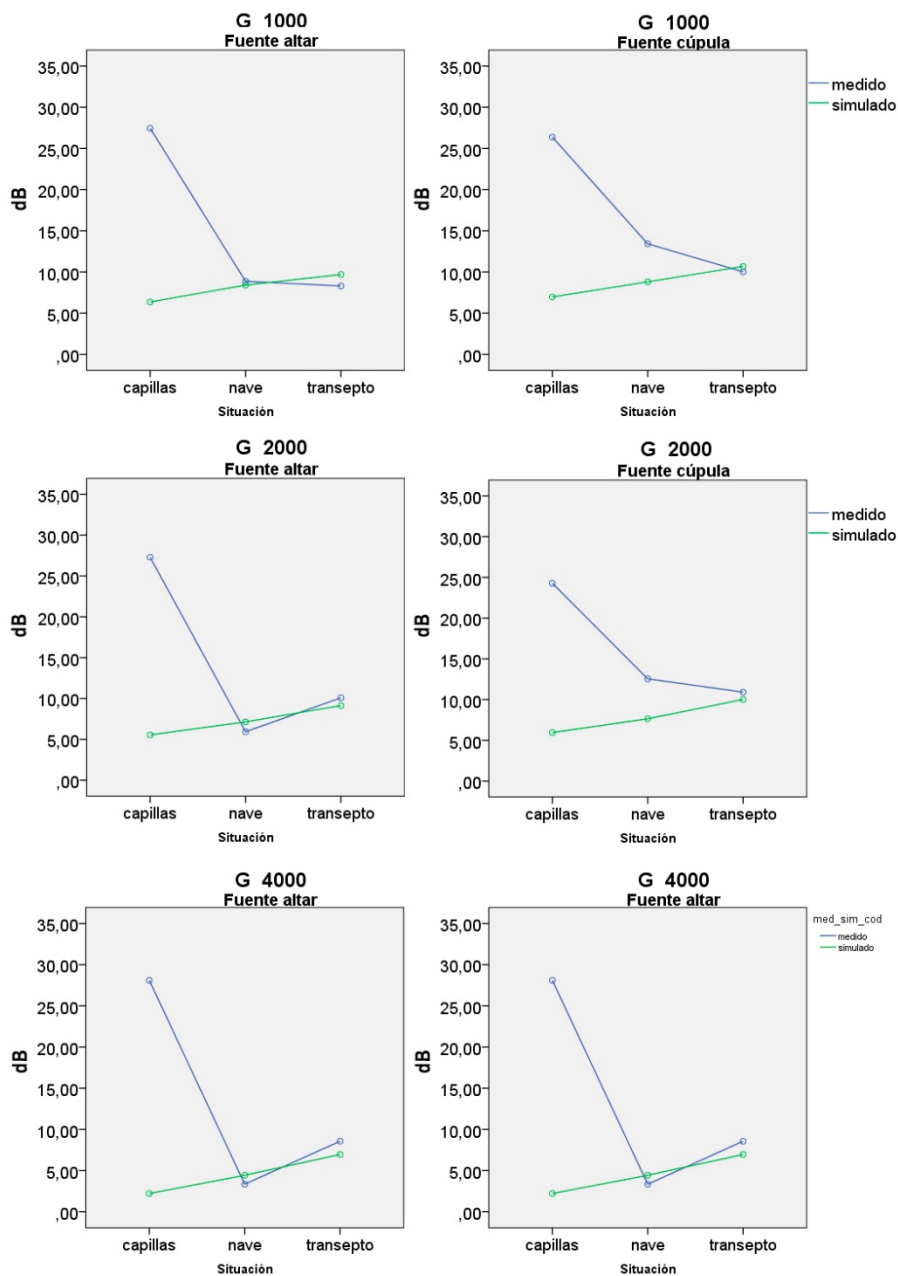


Figura IV.2.1.30. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

En las figuras IV.2.1.29 y IV.2.1.30 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de las capillas son muy superiores al resto, mientras que el comportamiento en la nave y el transepto es más similar. Esto sucede para todas las frecuencias en las dos posiciones de fuente.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo para las dos posiciones en las zonas de las capillas y el transepto, siendo la nave la que muestra las mayores variaciones.

En cuanto a la calibración, los resultados son malos en general, destacando especialmente la zona de las capillas. Únicamente se observan valores aproximados en el transepto a frecuencias entre 1000 y 4000 Hz y en la nave a las mismas frecuencias con la fuente en el altar.

La tabla IV.2.1.9 muestra la comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en la nave a todas las frecuencias, alcanzando el valor máximo de 6,6 dB a 2000 Hz para un valor medido de 6 dB. En las capillas y el transepto las diferencias entre una fuente y otra son mucho menores manteniendo valores inferiores a los 2 dB.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en la zona de la nave a todas las frecuencias excepto a 250 Hz.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND para todas las frecuencias en la nave y las capillas, mientras que en el transepto se superan en casos aislados.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son considerables en todos los casos, consiguiendo valores simulados similares a los medidos únicamente en el transepto a frecuencias medias y altas.

Existe diferencia estadísticamente significativa en un mayor número de casos, destacando las capillas a todas las frecuencias y la nave a bajas.

En términos de percepción se observan también grandes diferencias, superando con creces los 2 JND en todas las zonas a frecuencias bajas, y en las capillas y nave a medias y altas, alcanzando valores de 23 dB.

Tabla IV.2.1.9. Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
G_125	capillas	altar	23,375	6,610	3,072	3,072	1,875	0,667	1,88	16,765	<0,001	16,77
		cúpula	21,500	6,553	3,072	3,072				14,948	0,001	14,95
	nave	altar	13,989	8,230	1,182	1,182	-4,359	0,010	4,36	5,759	0,001	5,76
		cúpula	18,348	8,819	1,182	1,182				9,529	<0,001	9,53
	transepto	altar	15,200	9,408	2,508	2,508	-1,600	0,953	1,60	5,792	0,105	5,79
		cúpula	16,800	10,135	2,508	2,508				6,665	0,062	6,66
G_250	capillas	altar	24,975	7,960	3,057	3,057	1,100	0,800	1,10	17,015	<0,001	17,02
		cúpula	23,875	8,257	3,057	3,057				15,618	<0,001	15,62
	nave	altar	14,456	9,244	1,177	1,177	-2,822	0,092	2,82	5,211	0,002	5,21
		cúpula	17,278	9,848	1,177	1,177				7,430	<0,001	7,43
	transepto	altar	15,233	10,275	2,496	2,496	-0,550	0,876	0,55	4,958	0,162	4,96
		cúpula	15,783	11,037	2,496	2,496				4,747	0,181	4,75
G_500	capillas	altar	30,500	7,635	3,190	3,190	-0,650	0,886	0,65	22,865	<0,001	22,87
		cúpula	31,150	7,940	3,190	3,190				23,210	<0,001	23,21
	nave	altar	13,730	9,098	1,228	1,228	-3,519	0,045	3,52	4,631	0,009	4,63
		cúpula	17,248	9,587	1,228	1,228				7,661	<0,001	7,66
	transepto	altar	11,300	10,342	2,605	2,605	-0,517	0,889	0,52	0,958	0,795	0,96
		cúpula	11,817	11,162	2,605	2,605				0,655	0,859	0,65
G_1000	capillas	altar	27,450	6,360	3,251	3,251	1,075	0,815	1,08	21,090	<0,001	21,09
		cúpula	26,375	6,965	3,251	3,251				19,410	<0,001	19,41
	nave	altar	8,867	8,399	1,251	1,251	-4,548	0,011	4,55	0,467	0,792	0,47
		cúpula	13,415	8,805	1,251	1,251				4,610	0,010	4,61
	transepto	altar	8,300	9,692	2,654	2,654	-1,717	0,648	1,72	-1,392	0,711	1,39
		cúpula	10,017	10,667	2,654	2,654				-0,650	0,863	0,65
G_2000	capillas	altar	27,275	5,545	3,609	3,609	3,000	0,558	3,00	21,730	<0,001	21,73
		cúpula	24,275	5,958	3,609	3,609				18,318	<0,001	18,32
	nave	altar	5,930	7,141	1,389	1,389	-6,619	0,001	6,62	-1,211	0,539	1,21
		cúpula	12,548	7,644	1,389	1,389				4,904	0,014	4,90
	transepto	altar	10,083	9,128	2,947	2,947	-0,833	0,842	0,83	0,955	0,819	0,95
		cúpula	10,917	10,017	2,947	2,947				0,900	0,829	0,90
G_4000	capillas	altar	28,100	2,220	3,816	3,816	3,150	0,560	3,15	25,880	<0,001	25,88
		cúpula	24,950	2,937	3,816	3,816				22,013	<0,001	22,01
	nave	altar	3,348	4,432	1,469	1,469	-5,693	0,007	5,69	-1,084	0,603	1,08
		cúpula	9,041	5,391	1,469	1,469				3,650	0,081	3,65
	transepto	altar	8,567	6,955	3,116	3,116	-0,617	0,889	0,62	1,612	0,715	1,61
		cúpula	9,183	8,573	3,116	3,116				0,610	0,890	0,61
G_8000	capillas	altar	25,900		3,861		4,350	0,427	4,35			
		cúpula	21,550		3,861							
	nave	altar	-0,048		1,486		-5,196	0,015	5,20			
		cúpula	5,148		1,486							
	transepto	altar	4,867		3,152		-2,250	0,615	2,25			
		cúpula	7,117		3,152							

Los resultados demuestran que el parámetro G es más sensible que el resto de los analizados hasta ahora en lo referente a la posición de la fuente y presenta muy mal ajuste en la simulación. Sólo en un 30% de los casos la diferencia entre el valor medido y simulado es inferior a 2 JND.

Un valor alto del parámetro G indica que la sala amplifica el sonido, reforzándolo mediante sus reflexiones. A modo de referencia, según Beranek, en salas de conciertos, los valores recomendados se encuentran entre 4 y 5,5 dB.

Se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) e estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009). El rango de valores para la fuerza sonora es de un máximo de 9,4 dB y un mínimo de 5,8 dB, siendo el valor medio igual a 7,67 dB. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro G en la Basílica tiene valores elevados, muy por encima de los habituales en este tipo de espacios.

IV.2.1.4.3. Parámetros de inteligibilidad

La inteligibilidad es un parámetro esencial para la audición de la palabra y cuantifica la comprensión verbal. La inteligibilidad de la sala se ha descrito mediante el parámetro STI.

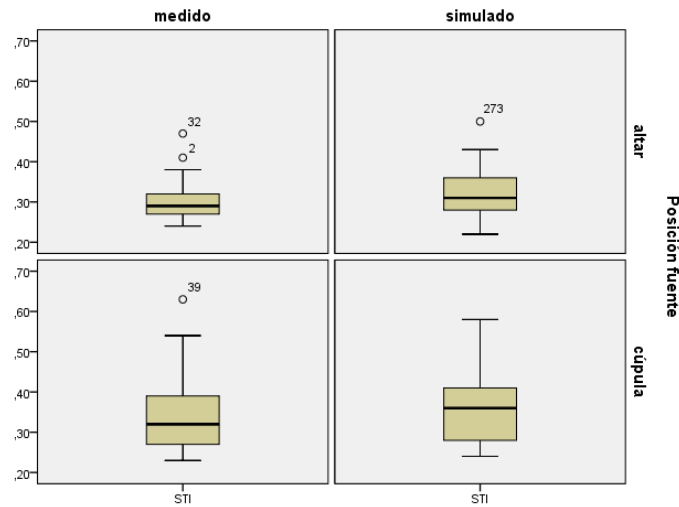


Figura IV.2.1.31. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro STI para la configuración de culto.

La figura IV.2.1.31 muestra la comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. muestra el diagrama de cajas para el parámetro STI. Se observa mientras que la variabilidad cuando la fuente se encuentra en el altar es mínima, aumenta considerablemente cuando ésta se sitúa bajo la cúpula obteniéndose también mejores valores en algunos puntos.

La figura IV.2.1.32 muestra gráficamente los valores medios obtenidos para cada zona y posición de fuente. Se observa que los valores son muy similares en todas las zonas, obteniendo resultados algo mejores en el transepto y peores en las capillas y prácticamente no se aprecia diferencia en función de la posición de la fuente. Los valores medidos y simulados se ajustan bien, únicamente se observa una diferencia mínima en el caso de la nave.

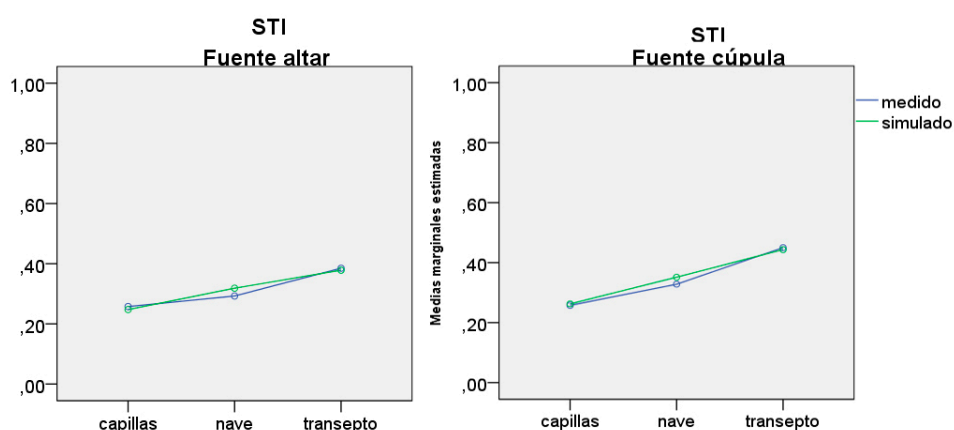


Figura IV.2.1.32. Valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente.

Tabla IV.2.1.10. Comparación de los valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

Situación	Fuente	Media		Error estándar		p	Dif. fuente	p	Dif. med-sim
		medido	simulado	medido	simulado				
capillas	altar	0,258	0,248	0,030	0,030	1,000	0,000	0,816	0,010
	cúpula	0,258	0,263	0,030	0,030			0,907	-0,005
nave	altar	0,293	0,319	0,012	0,012	0,033	-0,036	0,118	-0,026
	cúpula	0,328	0,351	0,012	0,012			0,159	-0,023
transepto	altar	0,385	0,378	0,025	0,025	0,035	-0,065	0,849	0,007
	cúpula	0,450	0,443	0,025	0,025			0,849	0,007

La tabla IV.2.1.10 recoge los valores medios medidos y simulados por zonas para el parámetro STI. Para que la inteligibilidad se considere buena los valores deben estar por encima de 0,7. Como se observa en todas las zonas se sitúan muy por debajo obteniéndose el máximo de 0,45 en el transepto cuando la fuente se encuentra en la cúpula. Atendiendo a los valores medidos, se puede concluir que la inteligibilidad es mala.

Las diferencias entre una fuente y otra son mínimas, las mayores se dan en el transepto, probablemente debido a la proximidad de los receptores con la fuente situada en la cúpula.

Existe diferencia estadísticamente significativa únicamente en las capillas.

Respecto a la validez de la simulación, los valores medidos y simulados difieren muy poco. No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

Se puede concluir que el parámetro STI se ajusta bien en la simulación.

El parámetro STI califica el grado de inteligibilidad de sala mediante un valor comprendido entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Los valores obtenidos en la Basílica se sitúan en torno a 0,26 en las capillas, 0,3 en la nave y 0,4 en el transepto. Atendiendo a la escala de correspondencia entre el grado de inteligibilidad y el valor de STI, que se recoge en el capítulo II.3, se puede afirmar que la inteligibilidad es mala en las capillas y la nave y pobre en el transepto.

A modo de referencia, aunque las dimensiones de la Basílica son mucho menores, los valores de STI en grandes espacios de culto se sitúan entre 0,25 y 0,44 (Álvarez-Morales et al., 2014).

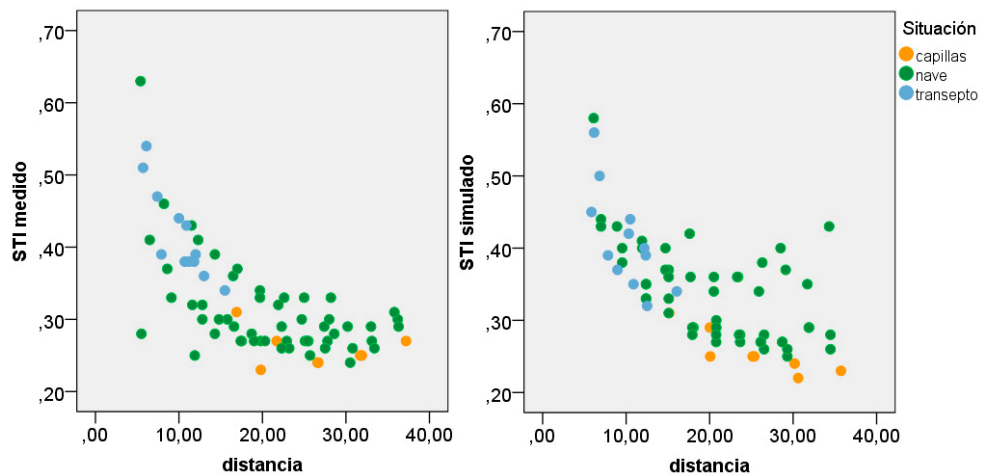


Figura IV.2.1.33. Correlación del parámetro STI con la distancia por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.

La figura IV.2.1.33 muestra la correlación del parámetro STI con la distancia. Se observa que la simulación del parámetro STI se ve también influida por la distancia a la fuente, y a que a medida que el receptor se aleja de ella los

valores se ajustan menos a los reales en el caso de la nave, aun que se mantienen similares en las capillas.

Hasta 20 metros de distancia el valor de los parámetros disminuye conforme ésta aumenta, manteniéndose constante a distancias mayores entre fuente y receptor.

IV.2.1.4.4. Parámetros de espacialidad

La sensación espacial cuantifica la percepción de sentirse envuelto por el sonido, dando la impresión de encontrarse en un espacio pequeño y estar cerca de la fuente sonora. Esta cualidad se potencia con la llegada adecuada de reflexiones laterales. El comportamiento espacial se ha estudiado mediante el parámetro binaural IACCA y el índice de fracción lateral LF.

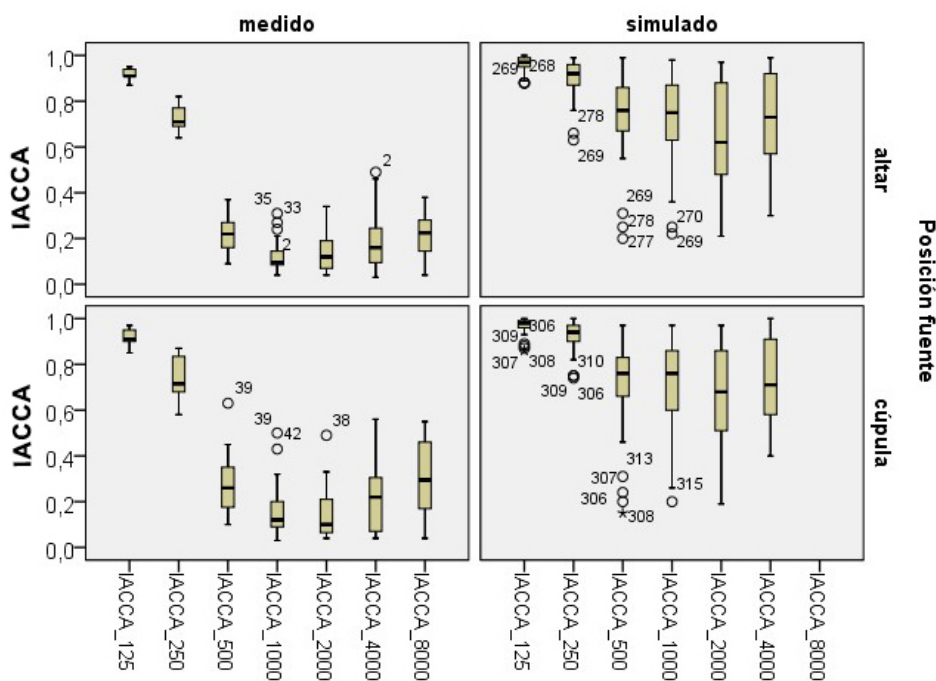


Figura IV.2.1.34. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro IACCA por frecuencias.

La figura IV.2.1.34 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro IACCA. Cabe destacar la similitud entre la simulación de este parámetro ya que los resultados de las medidas y las simulaciones son completamente diferentes.

En cuanto a las medidas, la variabilidad es baja, apenas existen puntos espurios y los que hay no presentan excesiva diferencia.

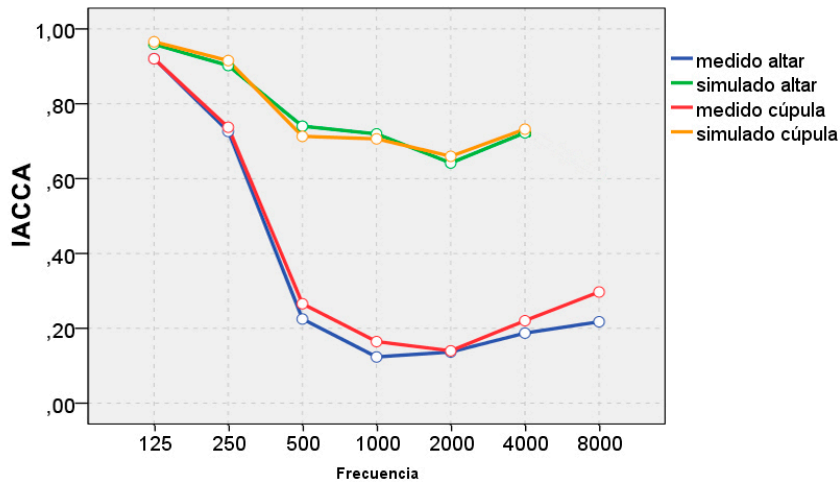


Figura IV.2.1.35. Valores de IACCA promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.1.35 muestra los valores de IACCA promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa de nuevo el distanciamiento entre los valores medidos y simulados. Las dos líneas correspondientes a las medidas son prácticamente paralelas entre sí y lo mismo ocurre con las dos que representan las simulaciones. Los valores simulados son muy superiores a los medidos.

En las figuras IV.2.1.36 y IV.2.1.37 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de la nave son en general superiores a las otras dos zonas.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo para las dos posiciones en todas las zonas.

En cuanto a la calibración, los resultados son malos en general, para todas las zonas. Únicamente se aproximan a 125 Hz, destacando las capillas como zona mejor ajustada. Para el resto de frecuencias los valores simulados son muy superiores a los medidos en todas las zonas.

Se puede deducir que aunque los resultados no se ajustan a la realidad en términos de valor, la simulación sí reproduce el comportamiento cualitativo frente al cambio de posición de la fuente sonora.

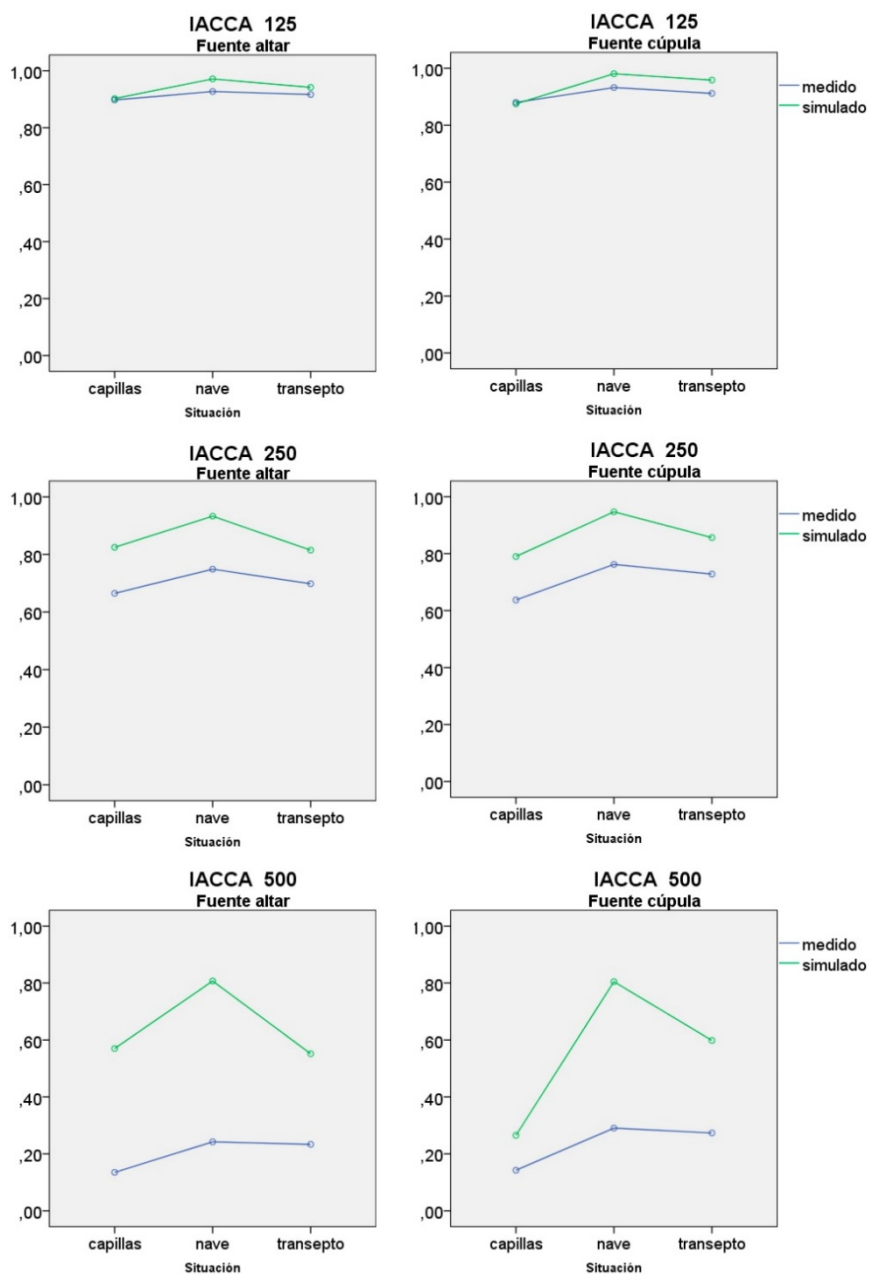


Figura IV.2.1.36. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

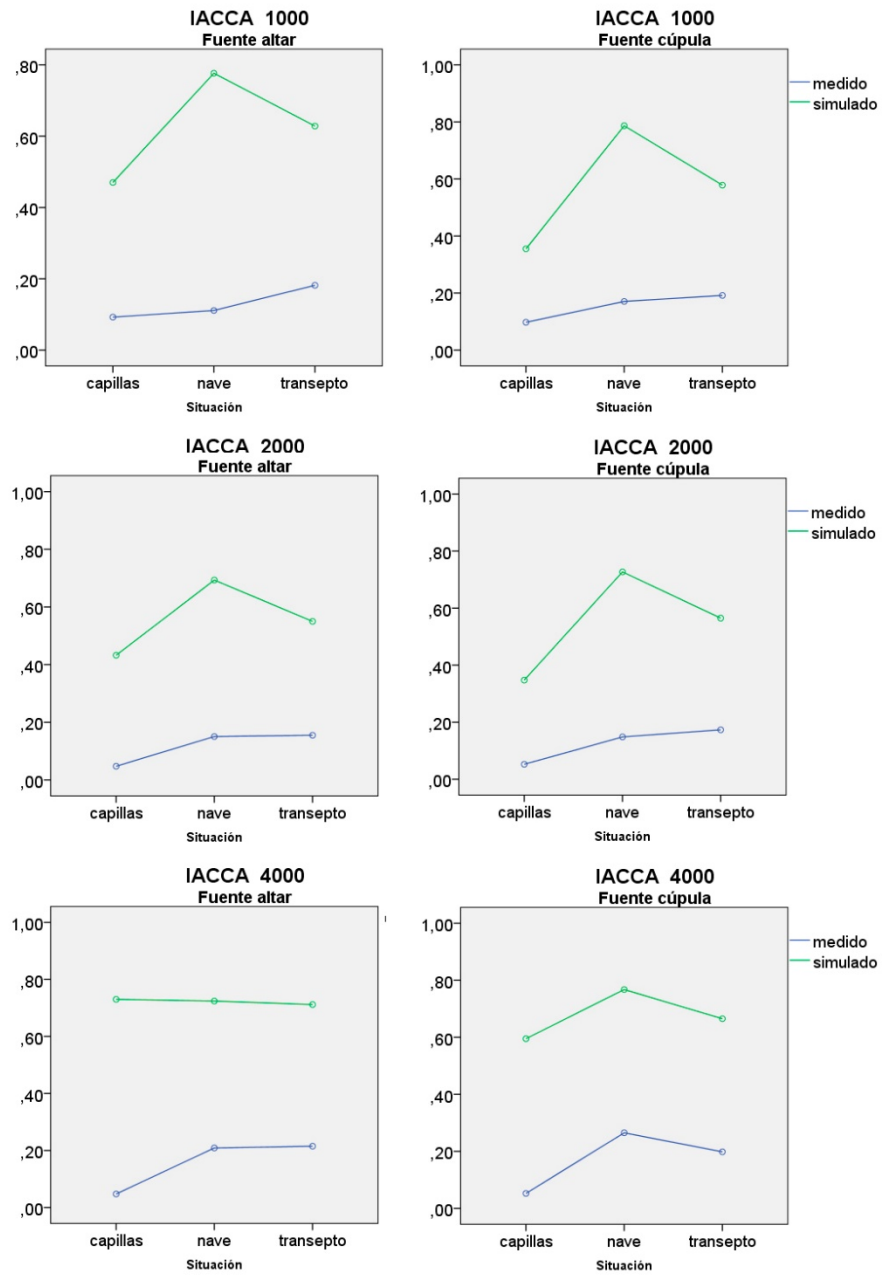


Figura IV.2.1.37. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.11. Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
IACCA 125	capillas	altar	0,898	0,903	0,011	0,011	0,018	0,232	0,22	-0,005	0,749	0,06
		cúpula	0,880	0,875	0,011	0,011				0,005	0,749	0,06
	nave	altar	0,927	0,971	0,005	0,004	-0,005	0,467	0,06	-0,044	<0,001	0,55
		cúpula	0,932	0,981	0,005	0,004				-0,049	<0,001	0,61
	transepto	altar	0,917	0,942	0,009	0,009	0,005	0,674	0,06	-0,025	0,052	0,31
		cúpula	0,912	0,958	0,009	0,009				-0,047	<0,001	0,58
IACCA 250	capillas	altar	0,665	0,825	0,029	0,029	0,028	0,521	0,34	-0,160	<0,001	2,00
		cúpula	0,638	0,790	0,029	0,029				-0,153	<0,001	1,91
	nave	altar	0,749	0,933	0,014	0,011	-0,013	0,509	0,17	-0,184	<0,001	2,30
		cúpula	0,762	0,947	0,014	0,011				-0,185	<0,001	2,31
	transepto	altar	0,698	0,815	0,024	0,024	-0,030	0,392	0,38	-0,117	0,001	1,46
		cúpula	0,728	0,857	0,024	0,024				-0,128	<0,001	1,60
IACCA 500	capillas	altar	0,135	0,570	0,061	0,061	-0,007	0,909	0,09	-0,435	<0,001	5,44
		cúpula	0,143	0,265	0,061	0,061				-0,123	0,155	1,53
	nave	altar	0,242	0,807	0,029	0,023	-0,048	0,122	0,60	-0,565	<0,001	7,06
		cúpula	0,291	0,805	0,029	0,023				-0,514	<0,001	6,43
	transepto	altar	0,233	0,552	0,049	0,049	-0,040	0,455	0,50	-0,318	<0,001	3,98
		cúpula	0,273	0,598	0,049	0,049				-0,325	<0,001	4,06
IACCA 1000	capillas	altar	0,093	0,470	0,069	0,069	-0,005	0,937	0,06	-0,378	<0,001	4,72
		cúpula	0,098	0,355	0,069	0,069				-0,258	0,009	3,22
	nave	altar	0,111	0,777	0,032	0,026	-0,059	0,050	0,74	-0,666	<0,001	8,32
		cúpula	0,171	0,787	0,032	0,026				-0,616	<0,001	7,70
	transepto	altar	0,182	0,628	0,056	0,056	-0,010	0,846	0,13	-0,447	<0,001	5,58
		cúpula	0,192	0,578	0,056	0,056				-0,387	<0,001	4,83
IACCA 2000	capillas	altar	0,048	0,433	0,079	0,079	-0,005	0,937	0,06	-0,385	0,001	4,81
		cúpula	0,053	0,348	0,079	0,079				-0,295	0,009	3,69
	nave	altar	0,151	0,693	0,037	0,030	0,002	0,941	0,03	-0,543	<0,001	6,78
		cúpula	0,148	0,727	0,037	0,030				-0,579	<0,001	7,23
	transepto	altar	0,155	0,550	0,064	0,064	-0,018	0,723	0,23	-0,395	<0,001	4,94
		cúpula	0,173	0,565	0,064	0,064				-0,392	<0,001	4,90
IACCA 4000	capillas	altar	0,048	0,730	0,082	0,082	-0,005	0,954	0,06	-0,683	<0,001	8,53
		cúpula	0,053	0,595	0,082	0,082				-0,543	<0,001	6,78
	nave	altar	0,209	0,724	0,038	0,031	-0,056	0,172	0,70	-0,515	<0,001	6,44
		cúpula	0,265	0,767	0,038	0,031				-0,502	<0,001	6,28
	transepto	altar	0,215	0,712	0,067	0,067	0,017	0,813	0,21	-0,497	<0,001	6,21
		cúpula	0,198	0,665	0,067	0,067				-0,467	<0,001	5,83
IACCA 8000	capillas	altar	0,055		0,087		0,000	1,000	0,00			
		cúpula	0,055		0,087							
	nave	altar	0,255		0,041		-0,118	<0,001	1,48			
		cúpula	0,373		0,041							
	transepto	altar	0,213		0,071		-0,017	0,751	0,21			
		cúpula	0,230		0,071							

La tabla IV.2.1.11 muestra la comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran a frecuencias medias y altas para la zona de la nave, alcanzando el máximo valor a frecuencias relevantes con 0,059 a 1000 Hz para un valor medido de 0,11.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos, correspondiendo a la zona la nave a 1000 y 8000 Hz.

A nivel de percepción, únicamente se supera 1 JND en la nave a 8000 Hz por lo que puede considerarse que no existen diferencias entre las dos posiciones de fuente estudiadas.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real, son mayores. Las máximas se encuentran a 1000 Hz, alcanzando el valor de 0,6 en la zona de la nave y a 4000 Hz en las capillas.

Existe diferencia estadísticamente significativa e n prácticamente todos los casos.

En términos de percepción, se superan los 2 JND en todas las zonas a partir de 500 Hz, llegando a 8 JND en los puntos los casos mencionados anteriormente.

Se puede concluir que el parámetro IACCA no presenta diferencias en función de la posición de la fuente para las dos posiciones estudiadas, pero no se ajusta en la simulación, ya que en únicamente un 30% de los casos las diferencias entre valores medidos y simulados están por debajo de los 2 JND.

El parámetro IACCA indica el grado de similitud que existe entre la señal que llega a un oído y a otro. Un valor de 1 indica que las señales son iguales, un valor de 0 indica que no existe relación entre ellas. Los valores obtenidos se encuentran en torno a 0,2 para frecuencias medias y altas, por lo que existe una diferencia perceptible considerable entre ambos oídos en todas las zonas. No obstante, dicha diferencia no se reproduce en la simulación.

Se ha comparado los valores obtenidos con los de nueve iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% de volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006). El rango de valores para el índice de correlación cruzada interaural es de un máximo de 0,469 y un mínimo de 0,245, siendo el valor medio igual a 0,365. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro IACC en la Basílica tiene valores bajos, ligeramente por debajo de los habituales en este tipo de espacios.

El segundo parámetro empleado para caracterizar la espacialidad de la Basílica es el índice de fracción de energía lateral LF.

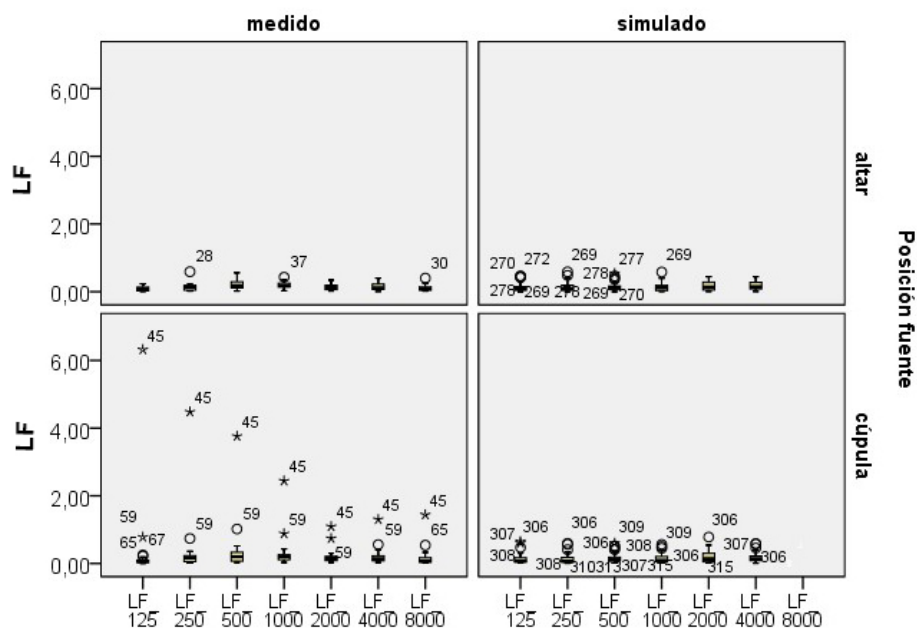


Figura IV.2.1.38. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro LF por frecuencias.

La figura IV.2.1.38 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro LF. La variabilidad entre puntos no es excesiva. Los puntos espurios son aislados en el caso de las medidas pero más numerosos en las simulaciones apuntando a problemas en la calibración de este parámetro.

La figura IV.2.1.39 muestra los valores de LF promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa que los valores medidos con la fuente en la cúpula se alejan considerablemente de los otros tres casos.

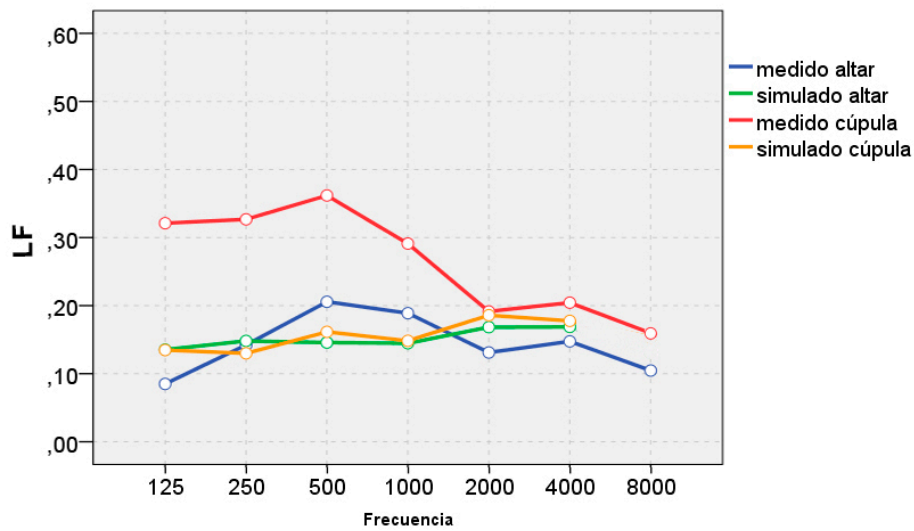


Figura IV.2.1.39. Valores de LF promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

En las figuras IV.2.1.40 y IV.2.1.41 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de la nave son siempre inferiores a las otras dos zonas.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento difiere entre ambos casos, sobre todo a 125, 500 y 1000 Hz.

En cuanto a la calibración, las dos simulaciones se asemejan al comportamiento medido con la fuente en el altar y no reproducen las diferencias en función de la posición de la fuente que se han detectado en las medidas.

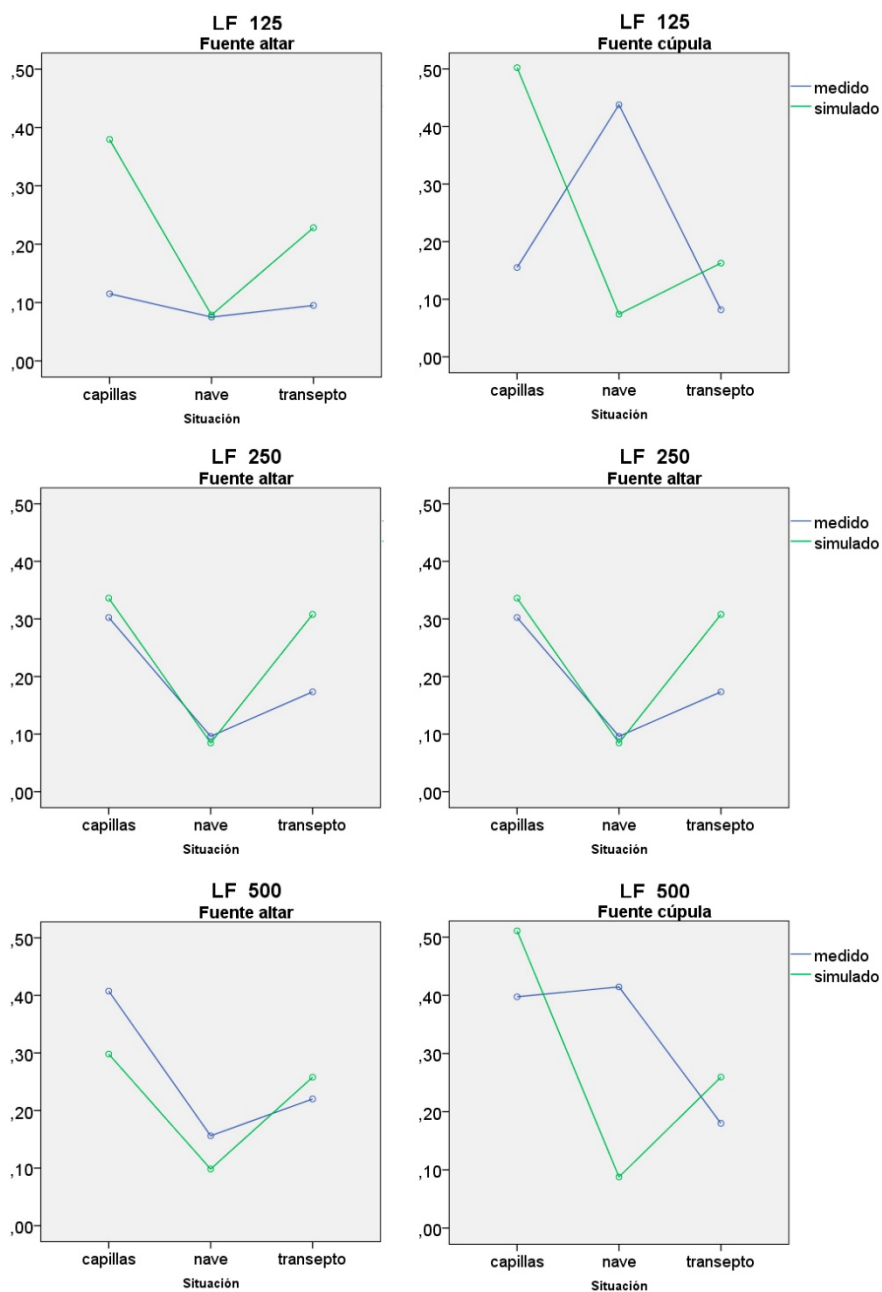


Figura IV.2.1.40. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

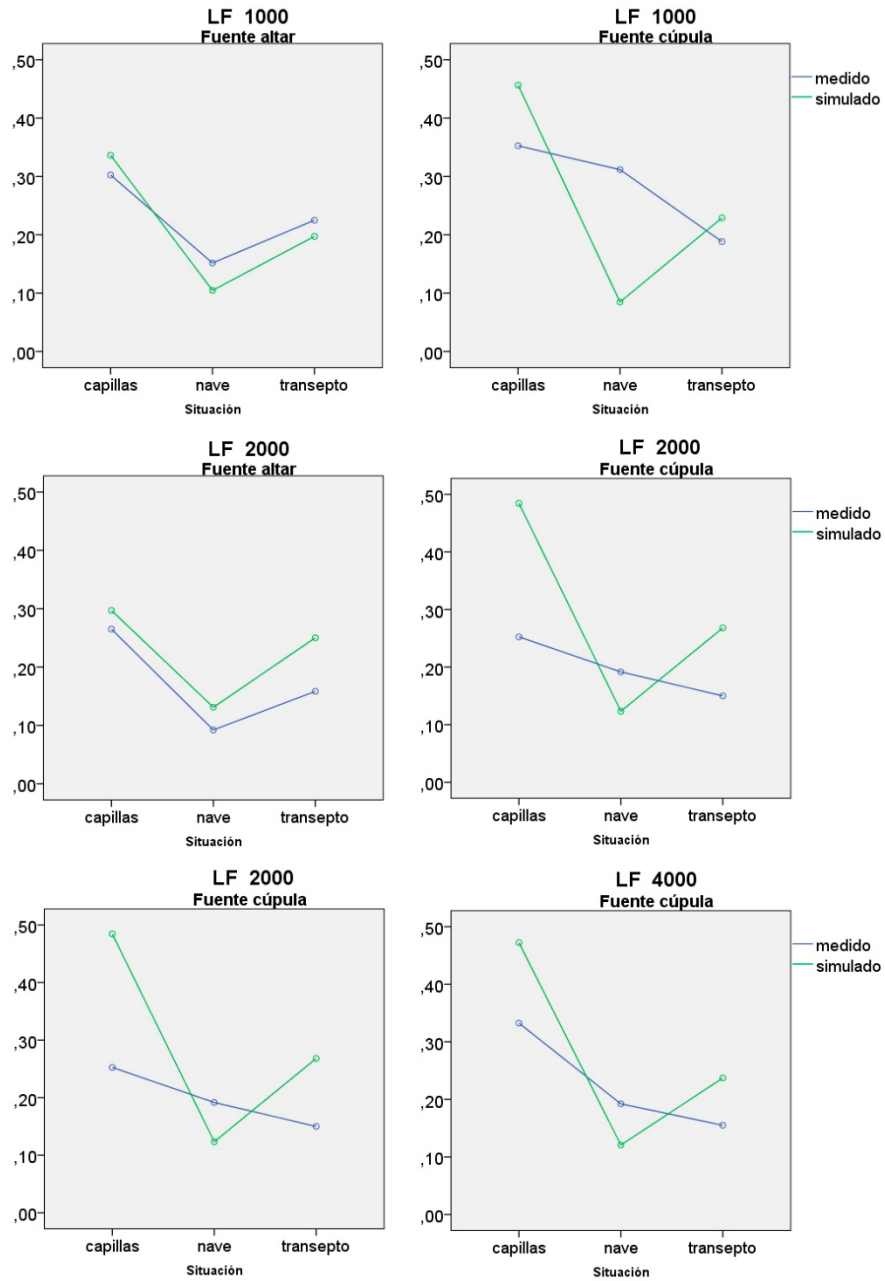


Figura IV.2.1.41. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.1.12. Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.

Frec.	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. Fuent	p	JND fuent	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
LF_125	capillas	altar	0,115	0,379	0,283	0,283	-0,040	0,921	0,50	-0,264	0,510	5,29
		cúpula	0,155	0,502	0,283	0,283				-0,347	0,387	6,95
	nave	altar	0,075	0,079	0,133	0,109	-0,363	0,057	4,53	-0,004	0,983	0,07
		cúpula	0,438	0,074	0,133	0,109				0,364	0,037	7,28
	transepto	altar	0,095	0,228	0,231	0,231	0,013	0,968	0,17	-0,133	0,684	2,67
		cúpula	0,082	0,163	0,231	0,231				-0,081	0,804	1,62
LF_250	capillas	altar	0,303	0,336	0,201	0,201	0,025	0,930	0,31	-0,034	0,906	0,67
		cúpula	0,278	0,388	0,201	0,201				-0,111	0,967	2,22
	nave	altar	0,096	0,085	0,095	0,077	-0,300	0,270	3,75	0,011	0,926	0,23
		cúpula	0,396	0,068	0,095	0,077				0,328	0,008	6,57
	transepto	altar	0,173	0,308	0,164	0,164	0,022	0,926	0,27	-0,135	0,563	2,69
		cúpula	0,152	0,238	0,164	0,164				-0,086	0,711	1,72
LF_500	capillas	altar	0,408	0,298	0,170	0,170	0,010	0,967	0,12	0,109	0,651	2,19
		cúpula	0,398	0,511	0,170	0,170				-0,113	0,639	2,27
	nave	altar	0,156	0,098	0,080	0,066	-0,258	0,025	3,23	0,058	0,578	1,16
		cúpula	0,414	0,088	0,080	0,066				0,327	0,002	6,53
	transepto	altar	0,220	0,258	0,139	0,139	0,040	0,839	0,50	-0,038	0,848	0,76
		cúpula	0,180	0,259	0,139	0,139				-0,079	0,687	1,59
LF_1000	capillas	altar	0,303	0,336	0,115	0,115	-0,050	0,759	0,63	-0,034	0,836	0,67
		cúpula	0,353	0,457	0,115	0,115				-0,104	0,524	2,08
	nave	altar	0,152	0,105	0,054	0,044	-0,160	0,039	2,00	0,047	0,504	0,94
		cúpula	0,312	0,085	0,054	0,044				0,227	0,002	4,54
	transepto	altar	0,225	0,197	0,094	0,094	0,037	0,783	0,46	0,028	0,835	0,55
		cúpula	0,188	0,229	0,094	0,094				-0,041	0,760	0,81
LF_2000	capillas	altar	0,265	0,297	0,073	0,073	0,013	0,904	0,16	-0,032	0,757	0,64
		cúpula	0,253	0,484	0,073	0,073				-0,232	0,027	4,64
	nave	altar	0,092	0,131	0,035	0,028	-0,099	0,044	1,24	-0,039	0,385	0,78
		cúpula	0,192	0,123	0,035	0,028				0,068	0,128	1,37
	transepto	altar	0,158	0,250	0,060	0,060	0,008	0,922	0,10	-0,092	0,279	1,84
		cúpula	0,150	0,268	0,060	0,060				-0,118	0,165	2,36
LF_4000	capillas	altar	0,300	0,297	0,073	0,073	-0,033	0,752	0,41	0,003	0,979	0,05
		cúpula	0,333	0,472	0,073	0,073				-0,140	0,176	2,80
	nave	altar	0,098	0,143	0,034	0,028	-0,094	0,053	1,18	-0,046	0,303	0,91
		cúpula	0,192	0,121	0,034	0,028				0,072	0,108	1,43
	transepto	altar	0,195	0,197	0,059	0,059	0,040	0,634	0,50	-0,002	0,986	0,03
		cúpula	0,155	0,237	0,059	0,059				-0,082	0,329	1,64
LF_8000	capillas	altar	0,253		0,073		-0,093	0,373	1,16			
		cúpula	0,345		0,073							
	nave	altar	0,070		0,034		-0,069	0,160	0,86			
		cúpula	0,139		0,034							
	transepto	altar	0,110		0,060		0,012	0,890	0,15			
		cúpula	0,098		0,060							

La tabla IV.2.1.12 muestra la comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en la nave a frecuencias bajas y medias, alcanzando el valor máximo de 0,36 a 125 Hz para un valor medido de 0,075.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos, correspondiendo a la zona de la nave, y con muy poca significación.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND a todas las frecuencias excepto a 8000 Hz, que lo hace en las capillas. El transepto es la zona que menores diferencias presenta.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son mayores a frecuencias bajas y medias en las capillas y la nave, alcanzando los valores máximos de 0,36 y 0,33 en la nave a 125, y 250 y 500 Hz respectivamente.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos correspondientes a la nave y las capillas a 1000 y 2000 Hz respectivamente.

En términos de percepción, se superan de forma importante los 2 JND en las capillas y la nave a frecuencias bajas y medias, llegando a 7 JND en los casos más desfavorables. En un 58% de los casos las diferencias se mantienen por debajo de los 2 JND.

Los valores de LF son directamente proporcionales a la cualidad de espacialidad de la sala. En este caso son bajos en la nave.

Se han comparado los valores obtenidos con los de nueve iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006). El rango de valores para el índice de fracción lateral es de un máximo de 0,304 y un mínimo de 0,175, siendo el valor medio igual a 0,248, por lo que la Basílica de Santa María se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose en la media.

IV.2.1.5. Conclusiones

A modo de resumen, la figura IV.2.1.42 representa todos los parámetros analizados y cuáles de ellos superan los 2 JND de diferencia entre medidas y simulación en función de la posición de la fuente y de la zona en la que se ubica el receptor. Se observa claramente que los principales problemas se presentan en los parámetros G e IACCA, en los que la simulación falla en todas las situaciones. El parámetro C50 presenta problemas en las capillas y el LF en el transepto. Prácticamente no existe diferencia en función de la posición de la fuente, salvo casos aislados.

el LF en la nave. Prácticamente no existe diferencia en función de la posición de la fuente, salvo casos aislados.

Por otra parte, la figura IV.2.1.43 muestra los valores medios en JND de las diferencias entre medidas y simulaciones para los parámetros estudiados por frecuencias para las tres zonas. Se observa que, aunque el comportamiento de cada uno de los parámetros es similar en las tres zonas existen diferencias entre unas y otras.

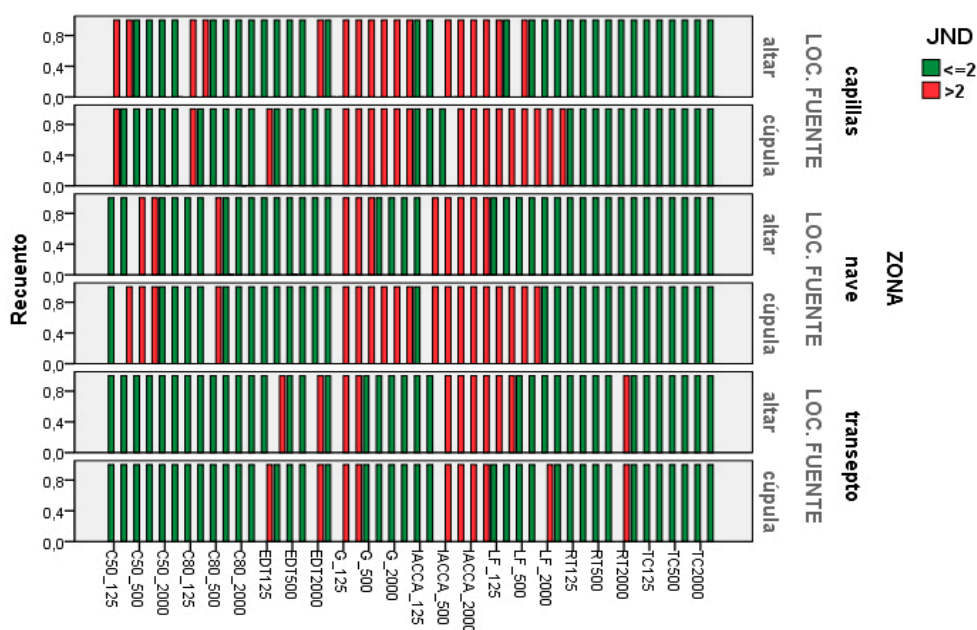


Figura IV.2.1.42. Parámetros que superan los 2 JND de diferencia entre medida y simulación en función de la frecuencia, la posición de la fuente y la zona en la que se ubica el receptor para la configuración de culto.

El transepto es la zona en la que se logra mayor ajuste en la simulación. Para todas las frecuencias, los parámetros C50, C80, LF RT y Ts se mantienen dentro de los 2 JND admisibles, y el EDT sólo los supera ligeramente a 2000 Hz. El parámetro G se ajusta mejor a frecuencias altas, situándose en el límite admisible mientras que en el caso del IACCA ocurre al contrario, ajustándose a frecuencias bajas, pero no a medias y altas.

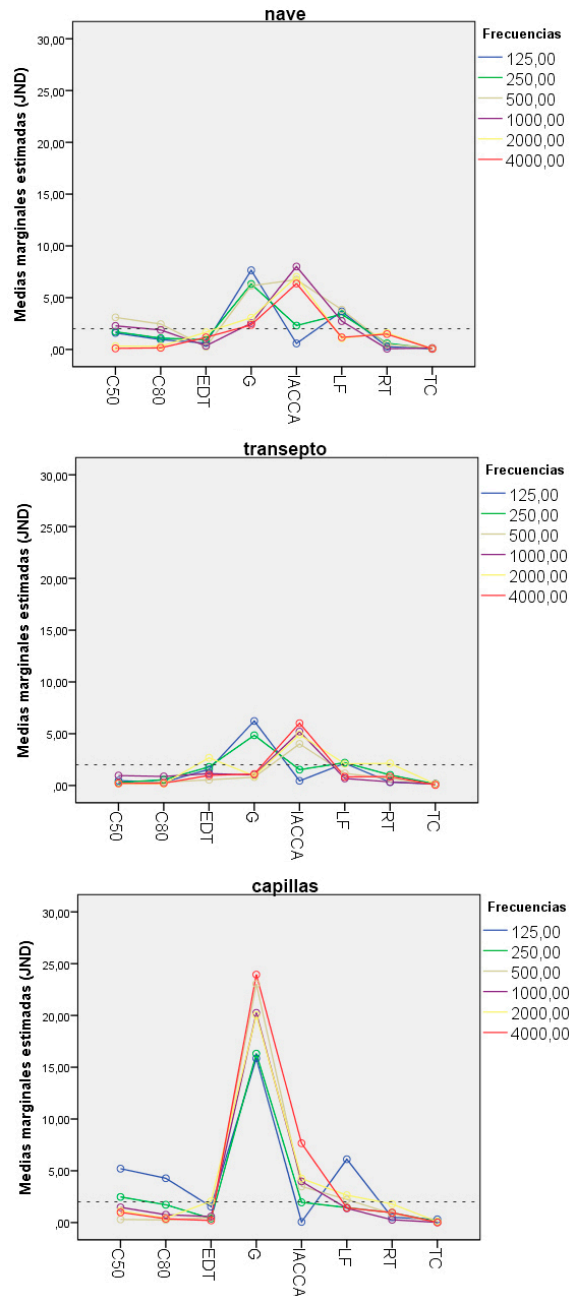


Figura IV.2.1.43. Diferencias entre valores medidos y simulados en términos de JND para cada parámetro y frecuencia.

En la nave, los parámetros EDT, RT y Ts se mantienen dentro de los 2 JND para todas las frecuencias. Los de energía, C50 y C80 se encuentran al límite para la frecuencia de 1000 Hz y superan por poco los 2 JND a la de 500 Hz, mientras que los espaciales y el energético G superan la diferencia de 2 JND alcanzando los 8 JND a 125Hz en el caso de G y a 4000 Hz en el del IACCA.

En las capillas, los parámetros EDT, RT y Ts, se mantienen por debajo de los 2 JND, pero los C50, C80 y LF tienen problemas a frecuencias bajas y G se dispara llegando a 25 JND a 4000 Hz.

Con todo ello, se puede concluir que los parámetros de reverberación son muy homogéneos, permiten un análisis global a nivel de sala ya que no presentan diferencias importantes entre unas zonas y otras, y se ajustan bien en la simulación.

Los valores en la Basílica son muy elevados, semejantes a los de las grandes catedrales españolas a pesar de contar con un volumen muy inferior, y superan los establecidos como óptimos tanto para el caso del habla como para la música de órgano y el canto coral, que son los tres usos que se dan habitualmente en la Basílica.

Los parámetros de energía no son homogéneos, es necesario un análisis por zonas y a que el comportamiento varía de unas a otras y se ajustan relativamente bien a la simulación aunque presentan diferencias en algunos puntos. En el caso de la Basílica la zona del transepto es la que presenta mayores diferencias con la posición de la fuente, probablemente debido a la proximidad de los receptores a las dos posiciones de fuente estudiadas.

Los parámetros C50, C80 y STI tienen una considerable correlación con la distancia. Cuando la distancia entre fuente y receptor supera los 20 metros los valores de los parámetros se estabilizan y la simulación aporta peores resultados.

Los parámetros de espacialidad no son homogéneos, requieren de un análisis por zonas y además se ajustan mal en la simulación por lo que los valores que aportan no pueden considerarse como buenos. Permiten un análisis cualitativo pero no cuantitativo del comportamiento acústico a través de la simulación. La zona del transepto es en la que se han obtenido mejores resultados en estos parámetros.

La Basílica se caracteriza por tener un mejor comportamiento para la música que para el habla. La zona en la que se obtienen mejores resultados es el transepto en el que la claridad para la música alcanza valores óptimos. Se trata de una sala muy viva y que amplifica notablemente el sonido. La reverberación es alta en todas las zonas y la inteligibilidad es mala, como es habitual en este tipo de espacios.

IV.2.2.

**La acústica de la
Basílica para la
representación del
Misteri**

IV.2.2.1. Configuración de la Basílica de Santa María para el Misteri

IV.2.2.1.1. Descripción

El espacio interior de la Basílica de Santa María, como ya se ha descrito, está formado por una nave única cubierta por una bóveda de cañón con lunetos, y cuatro capillas laterales a cada lado cubiertas por bóvedas de arista y comunicadas entre sí, y con el transepto, mediante perforaciones en los contrafuertes. Los brazos de transepto son cortos, ajustándose a la profundidad de las capillas, tienen la misma anchura que la nave y están cubiertos también por bóvedas de cañón. En el crucero se encuentra una gran cúpula sobre tambor y pechinas. Cuenta también con un ábside cubierto por una bóveda de cuarto de esfera y rodeado por un deambulatorio. Sobre éste y las capillas se encuentran las tribunas, que se abren al ábside y a la nave mediante cuatro y ocho balcones respectivamente, y se comunican entre ellas mediante balcones corridos que rodean perimetralmente los brazos del transepto y los pies de la nave.

Para la representación del Misteri d'Elx la Basílica sufre algunas transformaciones. Se colocan dos tribunas de madera elevadas en los laterales de la nave rodeando los pilares y una rampa en el centro de la misma que asciende desde la puerta principal hasta una plataforma elevada situada en el crucero. La rampa recibe el nombre de andador mientras que la plataforma es conocida como cadafal. La cúpula se cubre con una lona colocada en la base del tambor sobre las pechinas.

En cuanto a los materiales, se mantienen los descritos en el capítulo referente al culto pero se introducen también algunos nuevos. La fábrica de piedra se mantiene como material predominante presente en muros, pilares y bóvedas. Los materiales que componen el tambor y la cúpula quedan ocultos por la lona pintada que simula el cielo. La madera cobra presencia, al ser el material por el que están constituidos las tribunas, andador y cadafal, y se introduce un nuevo tipo de pavimento ya que los dos últimos están cubiertos por una alfombra. Las barandillas de los balcones y los púlpitos se cubren con telas pesadas de terciopelo rojo. El altar se traslada al cadafal y manteniéndose la cobertura de tela del mismo. Las figuras IV.2.2.1, IV.2.2.2 y IV.2.2.3 muestran el aspecto de la Basílica tras su transformación para la representación.

El público ocupa prácticamente la totalidad del espacio de la planta inferior rodeando el andador y el cadafal mirando hacia ellos, y distribuyéndose por la nave, tribunas, transepto y parte de las capillas, pero también en el ábside y los huecos de los arcos de la girola. Del mismo modo, se llenan los balcones de la planta superior.

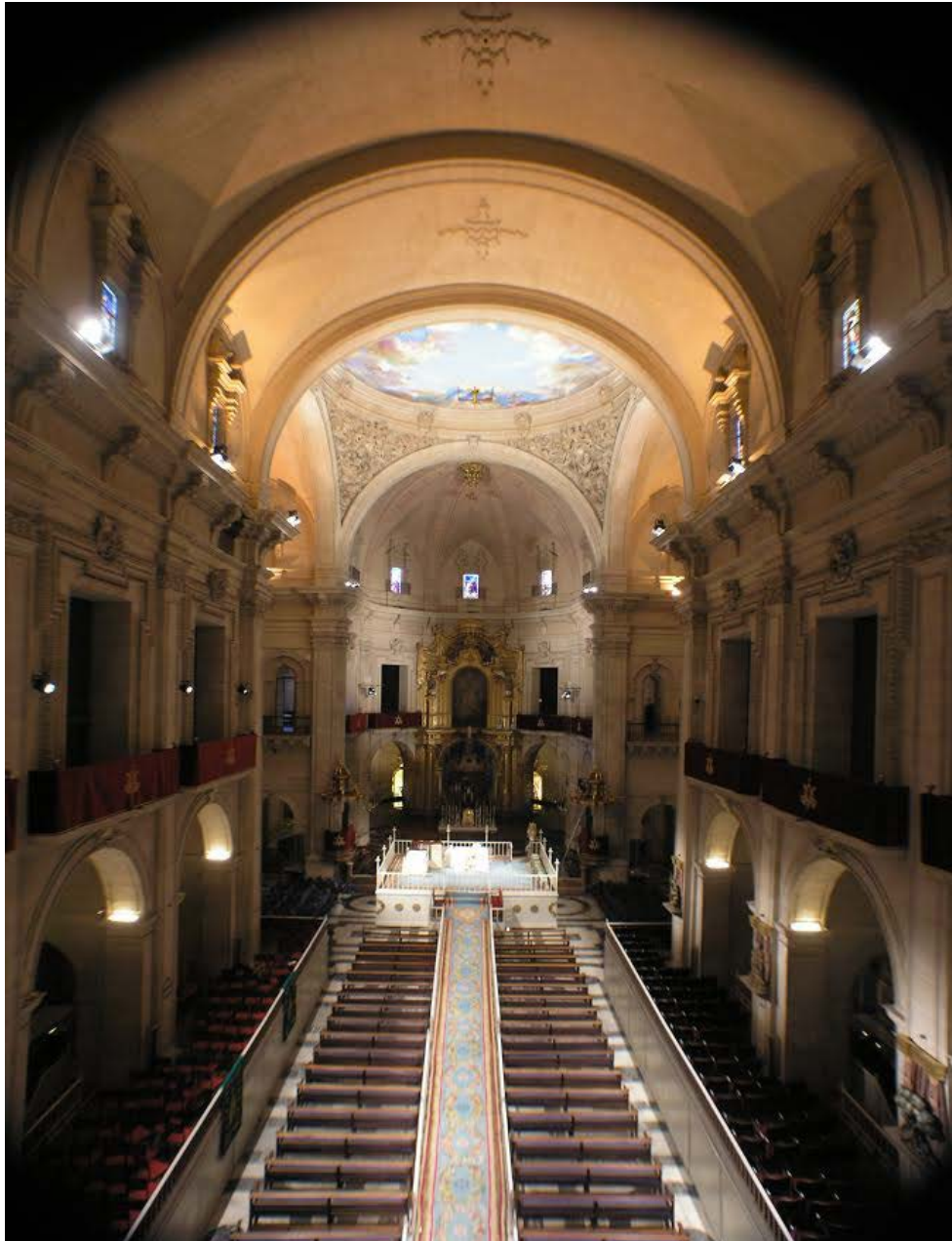


Figura IV.2.2.1. Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde los pies de la nave mirando hacia el altar. Autor: José David García Hernández.

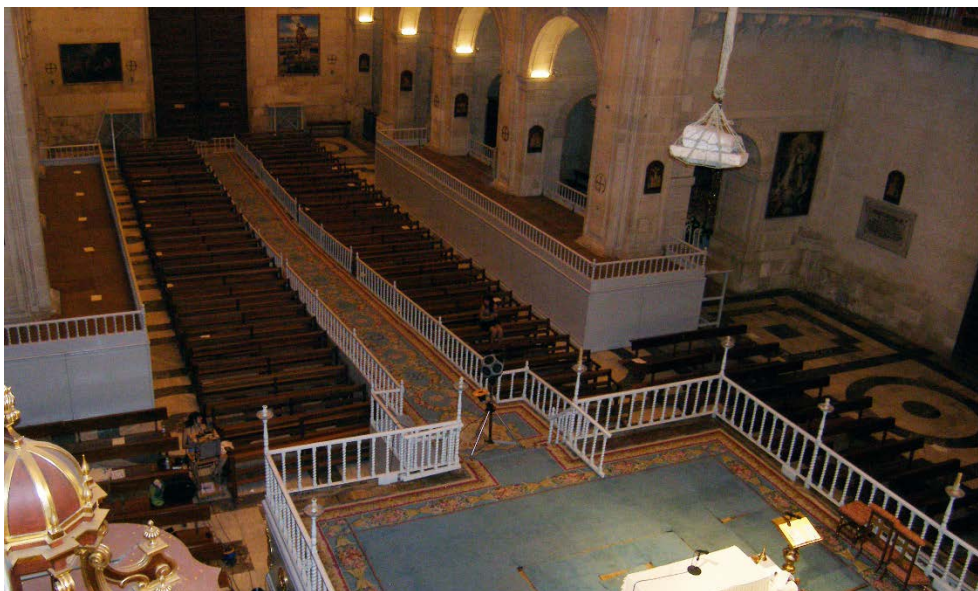


Figura IV.2.2.2. Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde el crucero mirando hacia los pies de la nave.



Figura IV.2.2.3. Detalle de la cúpula cubierta por la lona del cielo.

IV.2.2.1.2. Zonificación

La Basílica de Santa María es un edificio complejo compuesto por varios elementos en los que el espacio es diferente y, por tanto, cabe esperar que la percepción sonora también lo será. Por otra parte, para la representación del Misteri d'Elx se ocupan zonas de la Basílica que habitualmente se encuentran vacías como es el caso de los balcones o la zona del ábside. Además, se introducen las tribunas en los laterales de la nave. En base a todo esto, y como hacen otros investigadores (Pedrero et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) se ha realizado una zonificación previa con el fin de garantizar que todas las posibles variaciones es tuvieran recogidas en los resultados de la investigación.

Por ello se han establecido 6 zonas diferentes en las que la relación entre anchura, profundidad y altura, así como la interacción con la fuente son distintas: la nave, el transepto y las capillas, coincidiendo con las establecidas para el caso del culto, las tribunas, el ábside y los balcones. Su ubicación dentro del espacio de la Basílica se muestra en la figura IV.2.2.4.

Las características geométricas de la Basílica en este caso son las que muestra la tabla IV.2.2.1

Tabla IV.2.2.1. Características geométricas de la Basílica de Santa María en la configuración para el Misteri.

Volumen	Altura nave / transepto	Altura crucero	Área audiencia	Vol/ área audiencia
22600 m ³	24 m	24 m	633 m ²	35,70 m ³ /m ²

Si se analizan los diferentes espacios que la componen por separado, se observan grandes diferencias entre ellos, tal y como se muestra en la tabla IV.2.2.2.

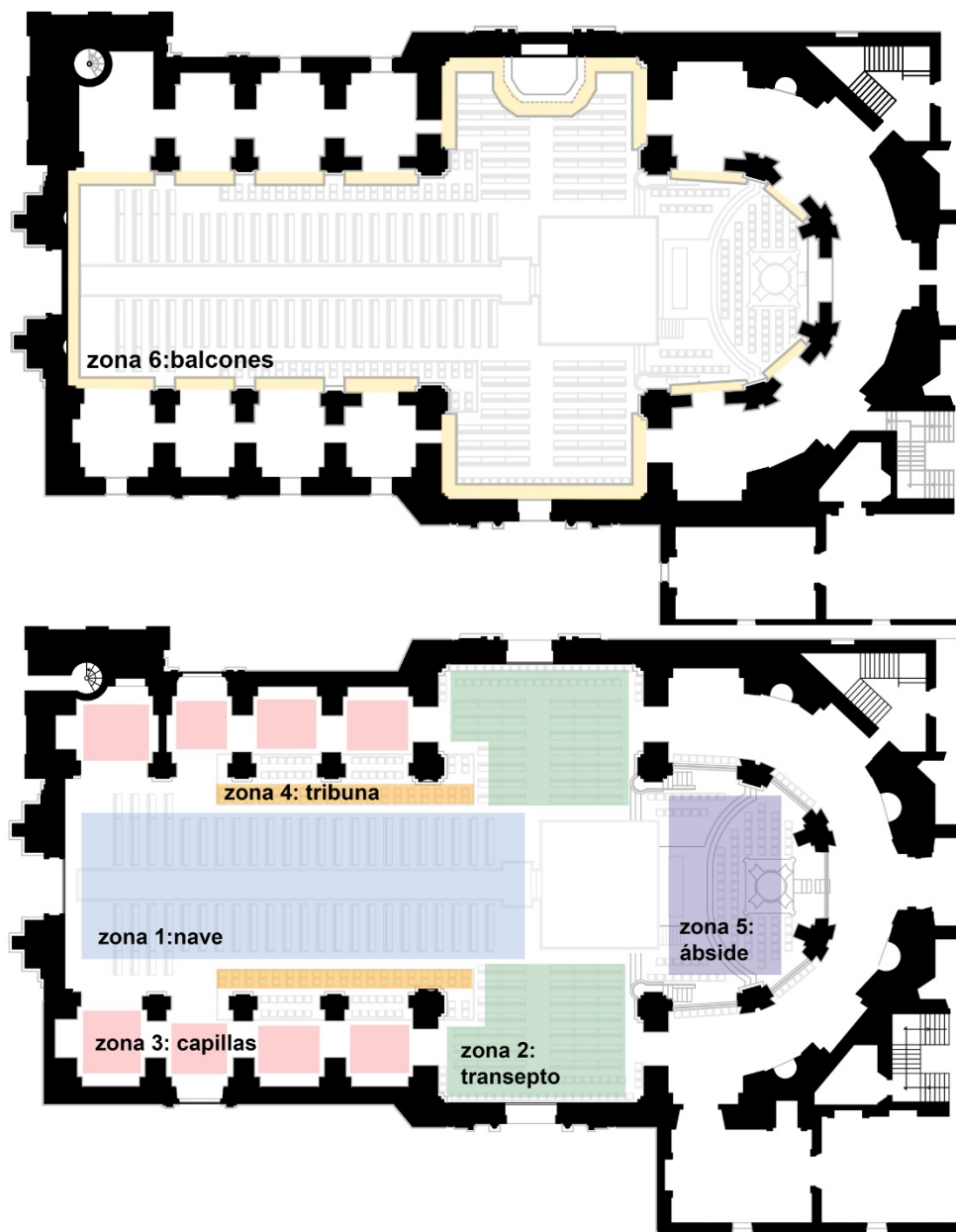


Figura IV.2.2.4. Zonas con características espaciales diferentes que pueden afectar al comportamiento acústico.

Tabla IV.2.2.2. Características geométricas de las distintas zonas que componen la Basílica en la configuración para el Misteri.

Zona	Ancho*prof* alto	Volumen	Área audiencia	Vol/ área audiencia
Nave	13x30x24 m	9504 m ³	390 m ²	24,37 m ³ / m ²
Capilla	4x5x7,5 m	150 m ³	20 m ²	7,50 m ³ / m ²
Transepto	13x7x24 m	4160 m ³	91 m ²	45,71 m ³ / m ²
Tribuna	1,5x16x20 m	480 m ³	24 m ²	20,00 m ³ / m ²
Ábside	15x10x24 m	3600 m ³	150 m ²	24,00 m ³ / m ²
Balcón	3,6x0,8x6 m	17,28 m ³	2,88 m ²	6,00 m ³ / m ²

IV.2.2.2. Posiciones registradas

En el caso de la basílica acondicionada para el Misteri se han establecido un total de 73 posiciones de receptor. Por un lado, 36 posiciones coincidiendo con las medidas para el culto. A demás, se han colocado 10 posiciones en las capillas y transepto del lado del evangelio, y se han incluido 37 posiciones correspondientes a los espacios que se ocupan únicamente para la representación.

Así se han tomado medidas con dos fuentes en 27 puntos de la nave central, en el centro de las 8 capillas, 12 posiciones en el transepto, 12 posiciones en las tribunas, 4 posiciones en el ábside y 21 en los balcones.

Las fuentes se han colocado sobre el cadafal coincidiendo con las posiciones para el culto, en el altar y bajo la cúpula. En la nave central se han colocado tres receptores por fila, en un total de nueve filas, coincidiendo con los pilares y los huecos de las capillas. En el transepto se han colocado en tres filas coincidiendo con las dos líneas de bancos. En las capillas, dada su reducida dimensión se han colocado en el centro de cada una de ellas. En las tribunas se han colocado coincidiendo con los pilares y los huecos de las capillas. En los balcones, en cada uno de los balcones aislados y en cada tramo de los balcones corridos. Las posiciones exactas, metodología, equipos y procedimiento empleado se explican con detalle en el capítulo III, mientras que los resultados completos de las medidas se recogen en el anexo 1.

IV.2.2.3. Modelo acústico para el Misteri

El modelo acústico final de la Basílica modificada para la representación del Misteri d'Elx ha sido construido mediante el software de modelado SketchUp ha estado constituido por un total de 5878 aristas y 2306 caras. Un número muy inferior al de los primeros modelos, tal y como se detalla en el capítulo IV.1 de esta tesis. La figura IV.2.2.5 muestra dos vistas del modelo en las que se aprecia el interior y exterior del mismo.

A partir de la inspección visual contrastada con el análisis de los proyectos de restauración y demás información sobre las obras realizadas en la Basílica a lo largo de su historia y que se detallan en el capítulo II.1, se han diferenciado los materiales incluidos en el punto 4.2 del capítulo III a los que se han asignado las propiedades acústicas detalladas en el mismo punto. Son los mismos que los empleados en el modelo y simulación de uso de culto, añadiendo en este caso la madera que compone las tribunas, el andador y el cadafal, la alfombra que los cubre y la lona del cielo que sustituye a la cúpula.

Como y a se ha comentado, los catálogos de materiales que incluyen propiedades acústicas se centran en materiales modernos y homogéneos, en su mayoría fabricados industrialmente. Por el contrario, los materiales presentes en edificación histórica son en su mayoría tradicionales y naturales, extraídos de zonas próximas a la construcción, y no ensayados en laboratorios mediante procedimientos normalizados. Esto ha supuesto una dificultad considerable al no existir bases de datos de este tipo de materiales y carecer de información sobre su comportamiento desde el punto de vista acústico.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, el material predominante en la Basílica es la fábrica de piedra, presente en muros, pilares y bóvedas y que compone en torno al 70 % de las superficies del espacio interior. No existen datos sobre este material por lo que se ha recurrido a estudios similares (Martellotta, 2009; Alonso et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) para disponer de valores de referencia y un orden de magnitud aproximado, a partir de los cuales se han ajustado los coeficientes para ajustar el modelo del culto a las medidas reales, manteniendo los coeficientes finales para el modelo del Misteri.

El segundo material más abundante es el mármol, presente en el pavimento de toda la planta baja y en elementos singulares del ábside como los muretes, los púlpitos y el tabernáculo. El mármol sí está recogido en catálogos y bases de datos de propiedades acústicas, por lo su caracterización ha sido más sencilla. Cabe tener en cuenta que el paso del tiempo y el desgaste podría haber alterado sus propiedades, no obstante, dada la dificultad de analizar este hecho y la escasa superficie que compone, en torno al 6,5%, respecto a la fábrica de piedra, se han tomado los valores normalizados.

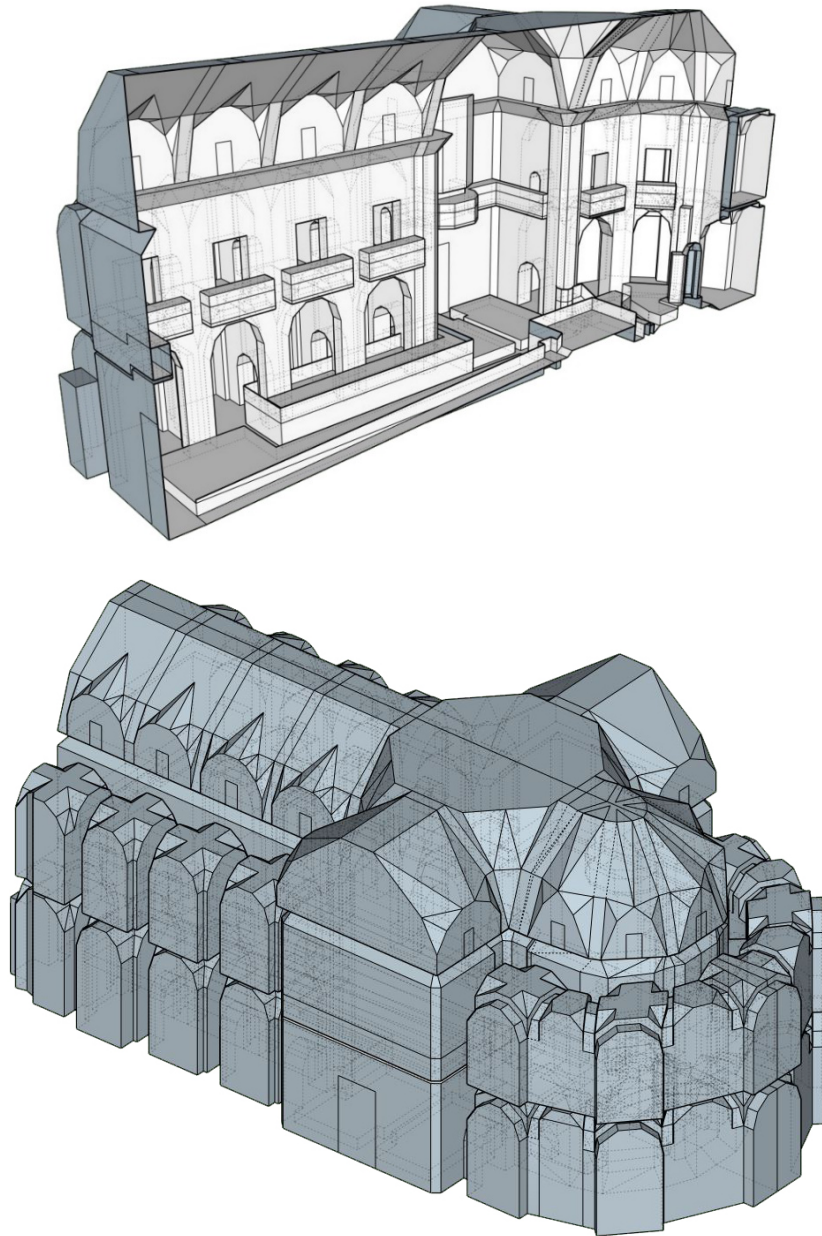


Figura IV.2.2.5. Imágenes del interior y el exterior del modelo acústico de la Basílica para el Misteri.

El mobiliario existente, que supone alrededor del 3% del área del modelo, se ha caracterizado a partir de la bibliografía existente y a que diferentes investigadores han realizado estudios específicos en bancos de iglesias.

La madera de las tribunas, andador y cadafal es el material que se ha empleado para calibrar el modelo en este caso, por ser el predominante de los materiales no existentes en el trabajo previo. Para ello se ha partido de los valores de absorción asignados a un podio de madera con aire en su interior, existentes en la biblioteca de materiales del software CATT Acoustics, y se han variado levemente los coeficientes para ajustar los resultados.

El resto de materiales representan una parte mínima de la superficie interior de la Basílica, incluyéndose en la tabla las distintas fuentes de las que se han extraído los datos.

Respecto a los coeficientes de dispersión, se han establecido tres niveles de dispersión en función de la irregularidad de las superficies, de acuerdo con investigaciones similares (Alonso et al., 2014; Álvarez-Morales et al., 2014) que se describen en el mismo apartado de la metodología.

IV.2.2.4. Caracterización acústica de la Basílica y validez de la simulación

Como se ha explicado en el capítulo 11.3 se han clasificado los parámetros estudiados en cuatro grupos: reverberación, energía, inteligibilidad y espacialidad, asociados con las principales cualidades subjetivas de las salas.

IV.2.2.4.1. Parámetros de reverberación

Para caracterizar la Basílica en lo relativo a su comportamiento reverberante se han analizado los parámetros tiempo de reverberación RT, considerando la caída de 30 dB (T30), y el tiempo de caída inicial EDT. La reverberación es la persistencia del sonido en la sala una vez cesa la emisión. Representa el grado de vivacidad de la sala y debe adecuarse al uso del recinto ya que no tiene los mismos requerimientos una representación teatral o un discurso verbal que los distintos tipos de música.

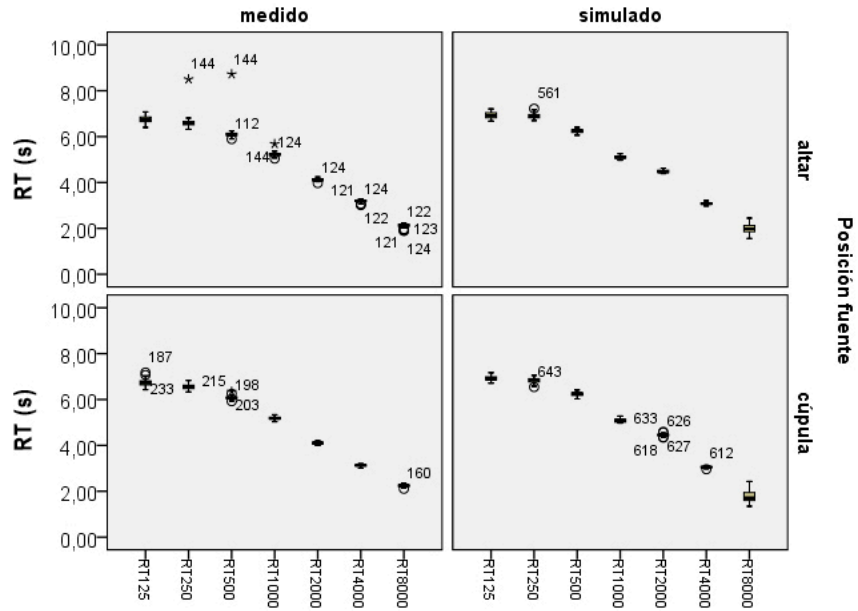


Figura IV.2.2.6. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro RT por frecuencias.

La figura IV.2.2.6 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias. Como se observa, hay muy poca variabilidad en los valores medidos en unos puntos y en otros para todas las frecuencias, tanto para las medidas como en las simulaciones, que se aproximan mucho a la realidad. Existen algunos puntos espurios pero con valores muy próximos a los del conjunto.

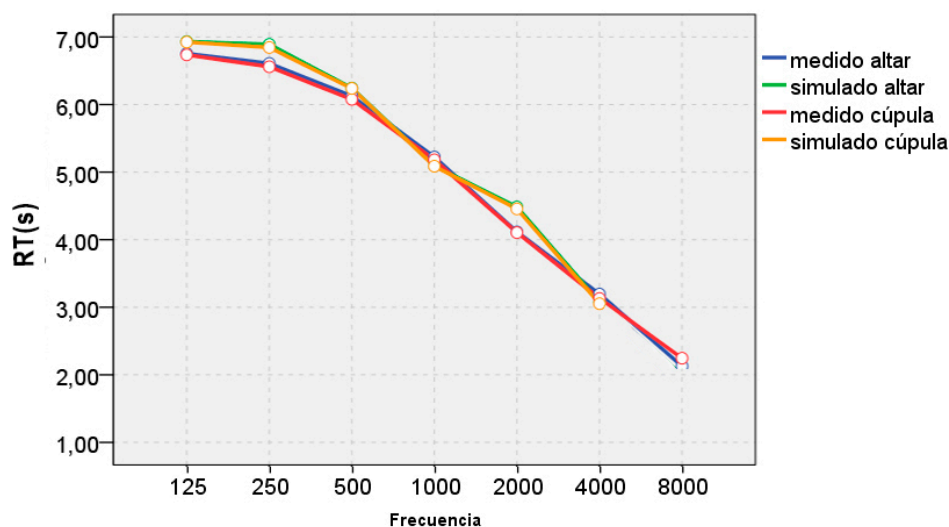


Figura IV.2.2.7. Valores de RT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.2.7 muestra los valores de RT promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, en función de la posición de la fuente: altar y cúpula. Al igual que en la configuración de culto, puede observarse que este parámetro no muestra apenas diferencias entre las dos posiciones de la fuente ni entre los valores medidos y simulados, aspectos que se han concretado en el análisis estadístico posterior. Únicamente se aprecian ligeras diferencias entre medida y simulación a frecuencias bajas y a 2000 Hz.

A título ilustrativo se muestran las gráficas por zonas para cada una de las posiciones de fuente y bandas de frecuencia, recogidas en las figuras IV.2.2.8 y IV.2.2.9. Se observa claramente el paralelismo entre los resultados obtenidos por ambas fuentes para todas las frecuencias, y el similar comportamiento en las seis zonas de recepción estudiadas. Se puede apreciar que se han obtenido valores de RT ligeramente superiores al resto en los balcones para las frecuencias de 250 y 500 Hz cuando la fuente se encuentra en el altar y algo inferiores en el ábside a frecuencias medias-altas para las dos posiciones de fuente siendo más evidente con la fuente en el altar.

La simulación se ajusta bien a frecuencias medias, al dejándose algo más a frecuencias bajas y sobre todo a 2000 Hz.

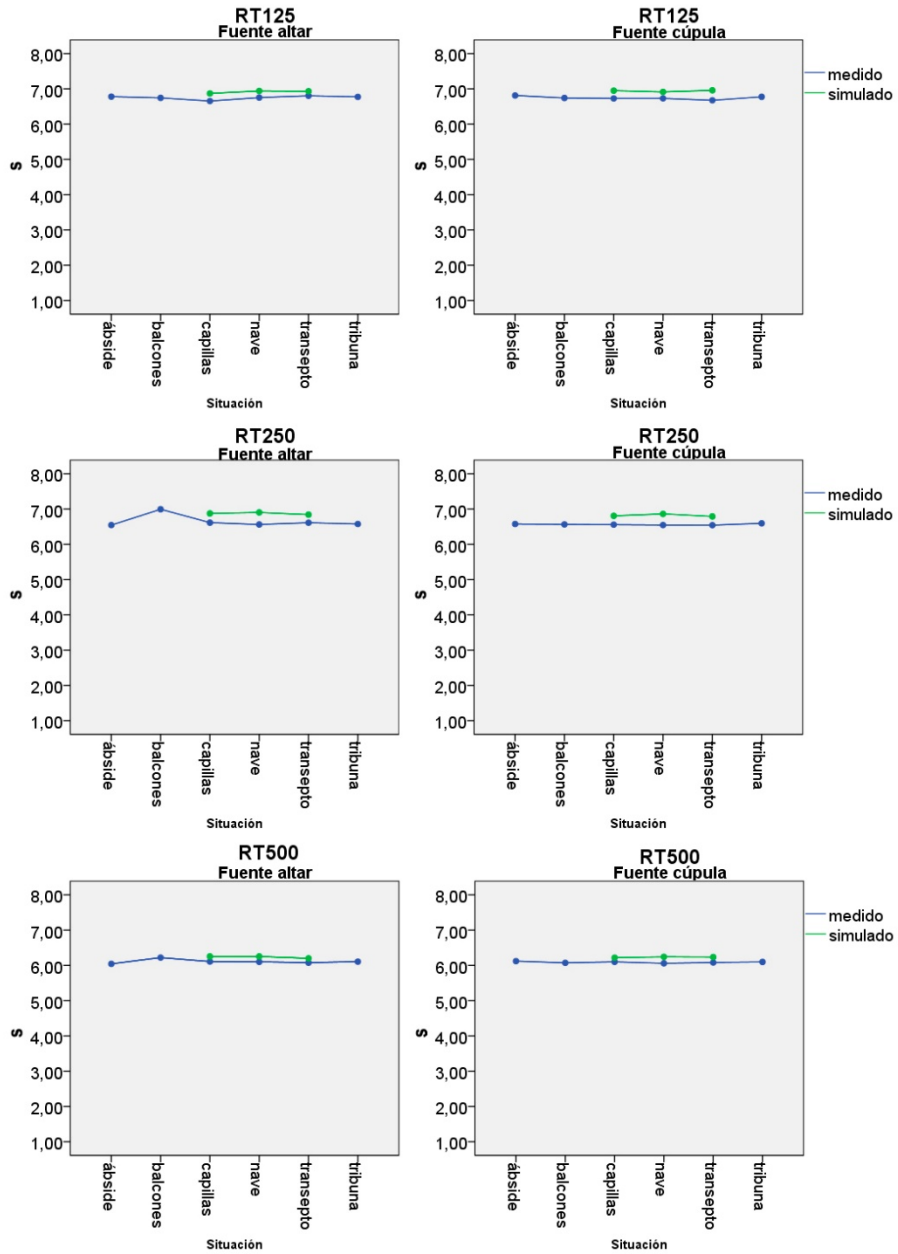


Figura IV.2.2.8. Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

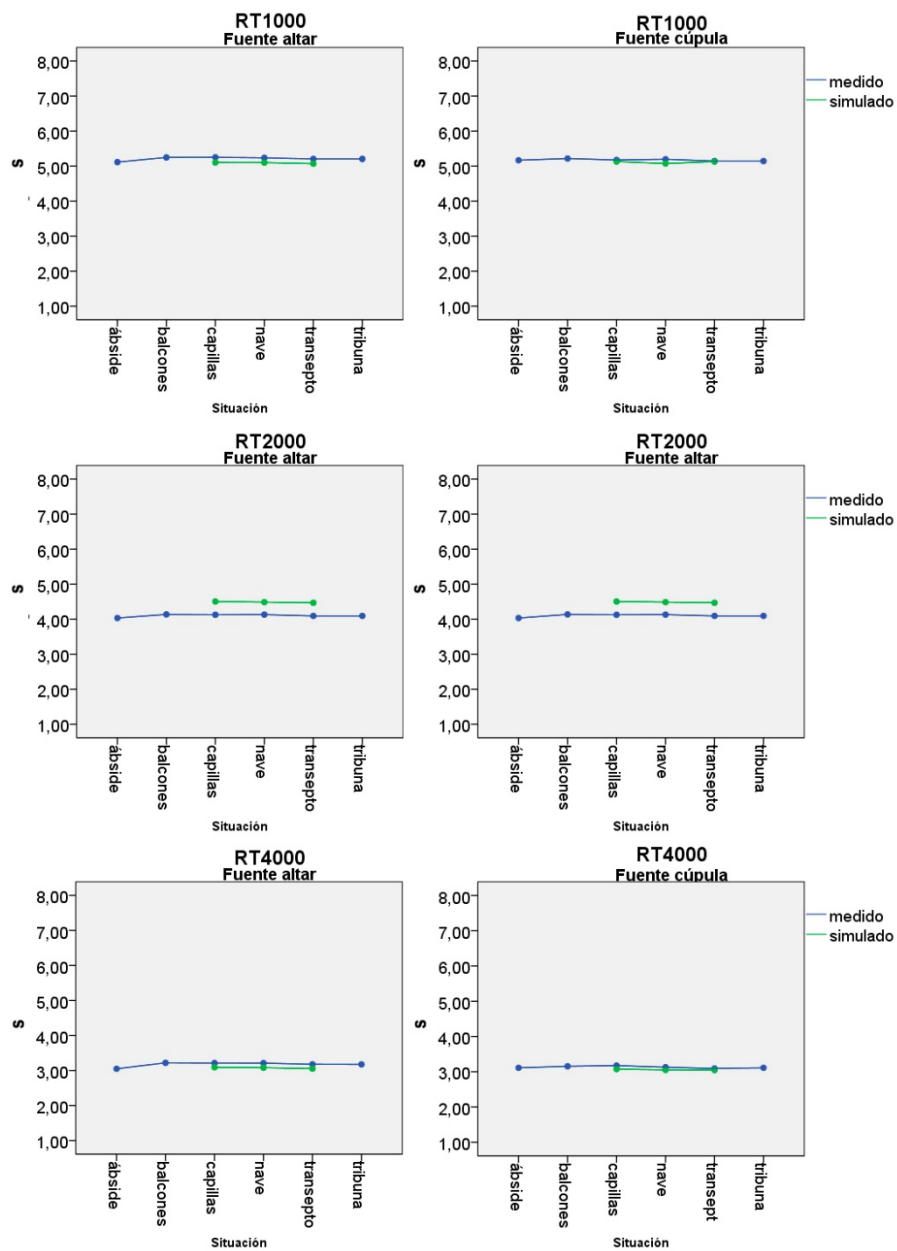


Figura IV.2.2.9. Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.3. Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuencia	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med_sim		med_sim								
			medido	sim	medido	sim							
RT125	ábside	altar	6,780		0,071		-0,032	0,748	0,10				
		cúpula	6,813		0,071								
	balcones	altar	6,745		0,031		0,003	0,948	0,01				
		cúpula	6,742		0,031								
	capillas	altar	6,654	6,870	0,054	0,071	-0,074	0,224	0,22	-0,216	0,017	0,65	
		cúpula	6,729	6,950	0,054	0,071				-0,221	0,014	0,66	
	nave	altar	6,754	6,941	0,027	0,027	0,024	0,353	0,07	-0,187	<0,001	0,55	
		cúpula	6,730	6,914	0,027	0,027				-0,184	<0,001	0,55	
	transepto	altar	6,804	6,932	0,041	0,058	0,128	0,315	0,38	-0,127	0,075	0,37	
		cúpula	6,676	6,958	0,041	0,058				-0,283	<0,001	0,85	
	tribuna	altar	6,773		0,041		-0,002	0,977	0,00				
		cúpula	6,775		0,041								
	RT250	ábside	altar	6,545		0,273		-0,030	0,938	0,09			
			cúpula	6,575		0,273							
balcones		altar	6,994		0,119		0,429	0,012	1,23				
		cúpula	6,565		0,119								
capillas		altar	6,614	6,875	0,207	0,273	0,057	0,797	0,17	-0,261	0,447	0,79	
		cúpula	6,557	6,808	0,207	0,273				-0,250	0,466	0,76	
nave		altar	6,562	6,904	0,105	0,105	0,016	0,785	0,05	-0,341	0,023	1,04	
		cúpula	6,546	6,862	0,105	0,105				-0,316	0,035	0,97	
transepto		altar	6,612	6,842	0,158	0,223	0,068	0,756	0,21	-0,230	0,401	0,70	
		cúpula	6,543	6,790	0,158	0,223				-0,247	0,368	0,75	
tribuna		altar	6,576		0,158		-0,019	0,932	0,06				
		cúpula	6,595		0,158								
RT500		ábside	altar	6,043		0,094		-0,078	0,581	0,26			
			cúpula	6,120		0,094							
	balcones	altar	6,221		0,041		0,150	0,011	0,48				
		cúpula	6,071		0,041								
	capillas	altar	6,107	6,253	0,071	0,094	0,009	0,794	0,03	-0,145	0,220	0,48	
		cúpula	6,099	6,218	0,071	0,094				-0,119	0,315	0,39	
	nave	altar	6,101	6,252	0,036	0,036	0,043	0,463	0,14	-0,151	0,003	0,50	
		cúpula	6,057	6,242	0,036	0,036				-0,185	<0,001	0,61	
	transepto	altar	6,075	6,200	0,054	0,077	-0,005	0,764	0,02	-0,125	0,186	0,41	
		cúpula	6,080	6,235	0,054	0,077				-0,155	0,101	0,51	
	tribuna	altar	6,106		0,054		0,008	0,914	0,03				
		cúpula	6,097		0,054								
	RT1000	ábside	altar	5,113		0,033		-0,053	0,263	0,21			
			cúpula	5,165		0,033							
balcones		altar	5,247		0,014		0,031	0,125	0,12				
		cúpula	5,215		0,014								
capillas		altar	5,250	5,103	0,025	0,033	0,077	0,398	0,29	0,147	<0,001	0,56	
		cúpula	5,173	5,130	0,025	0,033				0,043	0,302	0,17	
nave		altar	5,234	5,099	0,013	0,013	0,040	0,009	0,15	0,136	<0,001	0,52	
		cúpula	5,195	5,071	0,013	0,013				0,123	<0,001	0,47	
transepto		altar	5,203	5,068	0,019	0,027	0,060	0,972	0,23	0,135	<0,001	0,52	
		cúpula	5,143	5,130	0,019	0,027				0,013	0,687	0,05	
tribuna		altar	5,204		0,019		0,061	0,025	0,23				
		cúpula	5,143		0,019								

Tabla IV.2.2.4. Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuencia	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med	sim	med	sim							
			medido	sim	medido	sim							
RT2000	ábside	altar	4,033		0,023		-0,068	0,039	0,33				
		cúpula	4,100		0,023								
	balcones	altar	4,135		0,010		0,015	0,298	0,07				
		cúpula	4,120		0,010								
	capillas	altar	4,124	4,503	0,017	0,023	-0,023	0,430	0,11	-0,378	<0,001	1,83	
		cúpula	4,147	4,448	0,017	0,023				-0,300	<0,001	1,45	
	nave	altar	4,130	4,486	0,009	0,009	0,023	0,001	0,11	-0,356	<0,001	1,72	
		cúpula	4,107	4,451	0,009	0,009				-0,345	<0,001	1,68	
	transepto	altar	4,092	4,467	0,013	0,019	0,020	0,798	0,10	-0,374	<0,001	1,83	
		cúpula	4,073	4,478	0,013	0,019				-0,406	<0,001	1,99	
	tribuna	altar	4,093		0,013		0,007	0,722	0,03				
		cúpula	4,087		0,013								
	RT4000	ábside	altar	3,050		0,019		-0,060	0,024	0,39			
			cúpula	3,110		0,019							
balcones		altar	3,220		0,008		0,065	<0,001	0,40				
		cúpula	3,155		0,008								
capillas		altar	3,213	3,093	0,014	0,019	0,039	0,092	0,24	0,120	<0,001	0,75	
		cúpula	3,174	3,075	0,014	0,019				0,099	<0,001	0,63	
nave		altar	3,211	3,082	0,007	0,007	0,083	<0,001	0,52	0,130	<0,001	0,81	
		cúpula	3,129	3,052	0,007	0,007				0,077	<0,001	0,49	
transepto		altar	3,178	3,053	0,011	0,015	0,085	0,001	0,54	0,124	<0,001	0,78	
		cúpula	3,092	3,048	0,011	0,015				0,044	0,019	0,29	
tribuna		altar	3,176		0,011		0,065	<0,001	0,41				
		cúpula	3,111		0,011								
RT8000		ábside	altar	1,928		0,053		-0,303	<0,001	3,14			
			cúpula	2,230		0,053							
	balcones	altar	2,150		0,023		-0,123	<0,001	1,14				
		cúpula	2,273		0,023								
	capillas	altar	2,191		0,040		-0,100	0,614	0,91				
		cúpula	2,291		0,040								
	nave	altar	2,146		0,020		-0,099	<0,001	0,93				
		cúpula	2,245		0,020								
	transepto	altar	2,085		0,031		-0,104	0,557	1,00				
		cúpula	2,189		0,031								
	tribuna	altar	2,117		0,031		-0,115	0,009	1,09				
		cúpula	2,232		0,031								

La tabla IV.2.2.3 muestra la comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en los balcones, alcanzando el máximo de 0,43 segundos a 250 Hz para un valor medido de 6,99 segundos. En la mayoría de casos, salvo tres, las diferencias son inferiores a 0,1 segundos.

Hay muy pocos casos en los que exista diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre los valores medidos, sólo ocurre en cuatro casos.

A nivel de percepción sólo se supera ligeramente el valor de 1 JND en los balcones a 250 Hz (1,23 JND) por lo que se puede considerar que para las posiciones de fuente estudiadas no hay diferencias.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, aunque las diferencias son algo mayores en términos de valor real, los resultados obtenidos al comparar los valores medios por zonas del parámetro RT son buenos para todas las posiciones de fuente y receptor estudiadas y todas las frecuencias. Existen mayores diferencias estadísticamente significativas pero a nivel de percepción los resultados muestran que no se superan los 2 JND en ningún caso.

La tabla IV.2.2.4 muestra la comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares. En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran ahora en la planta baja, alcanzando el máximo de 0,3 segundos a 8000 Hz en el ábside para un valor medido de 1,92 segundos. A 2000 y 4000 Hz las diferencias son inferiores a 0,1 segundos en todas las zonas.

A diferencia de lo que ocurría a frecuencias bajas y medias, existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre los valores medidos en la mayoría de casos.

No obstante, en términos de percepción, sólo existen diferencias superiores a 1 JND a la frecuencia de 8000 Hz que como ya se ha comentado en varias ocasiones carece de importancia por lo que de nuevo puede considerarse que no existen diferencias para las dos posiciones de fuente estudiadas.

En cuanto a la calibración del modelo, los resultados son los mismos que a frecuencias medias y bajas, sin superarse los 2 JND en ningún caso. De nuevo, se puede concluir que el parámetro RT tiene un comportamiento muy homogéneo y permite una buena simulación.

Dada la singularidad, tanto de los elementos que configuran el espacio para la representación, como del Misteri en sí, la semejanza con otros estudios es relativa. No obstante, a título ilustrativo, se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares, tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María, estudiadas por

diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para el tiempo de reverberación es de un máximo de 8,9 segundos y un mínimo de 3,9 segundos, siendo el valor medio igual a 5,34 segundos por lo que la Basílica de Santa María para la representación del Misteri se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose en la media.

Por otra parte, dado el alto nivel de ocupación de la Basílica durante la representación del Misteri, los resultados relevantes serán aquellos obtenidos con la sala llena y que se analizarán en capítulos posteriores.

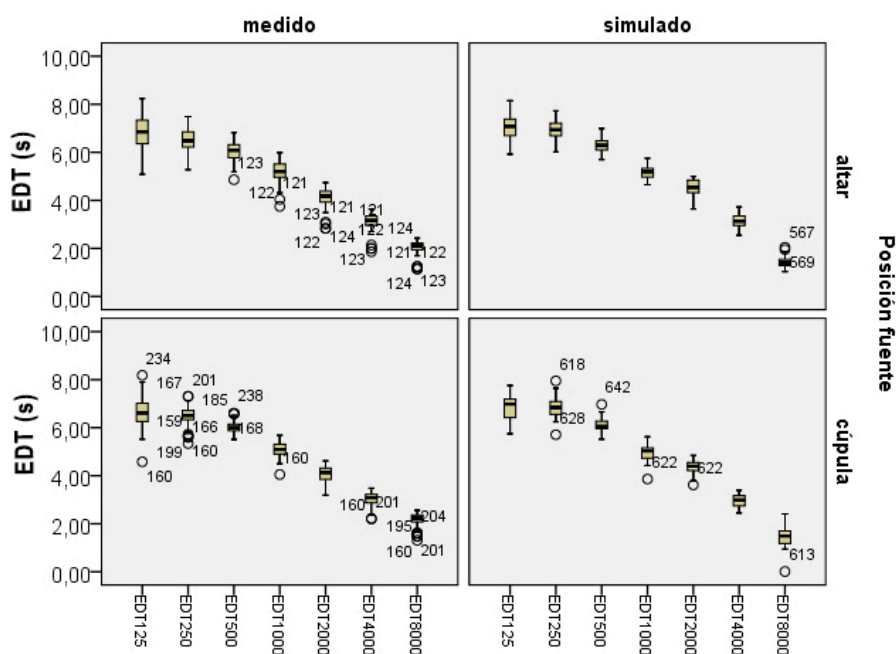


Figura IV.2.2.10. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro EDT por frecuencias.

La figura IV.2.2.10 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro EDT. Al igual que ocurría con el parámetro RT, la dispersión en general es baja y existe muy poca variabilidad en los valores medidos en unos puntos y en otros a frecuencias medias y altas. No obstante, en este caso aumenta a frecuencias bajas y se observan algunos puntos espurios a frecuencias altas en los valores medidos con la

fuelle en el altar y a todas las frecuencias con la fuente bajo la cúpula, aunque se alejan muy poco.

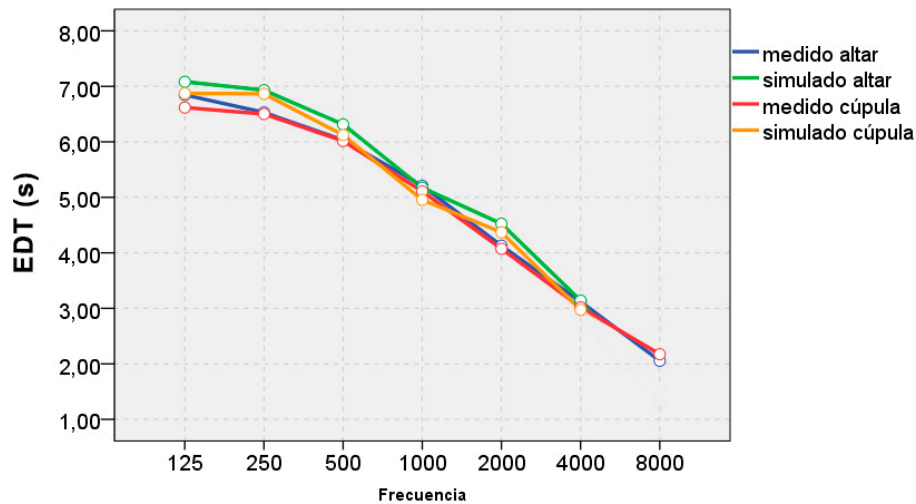


Figura IV.2.2.11. Valores de EDT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.2.11 muestra los valores de EDT promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica para la representación del Misteri y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Puede observarse que, al igual que en el caso anterior, este parámetro no muestra apenas diferencias entre las dos posiciones de la fuente, aunque sí se aprecian ligeras variaciones entre los valores medidos y simulados de nuevo a frecuencias bajas y a 2000 Hz.

El EDT sigue la tendencia del tiempo de reverberación, habitual en los recintos de culto, con valores muy similares que se sitúan entre 6,5 y 7 segundos para las frecuencias más bajas y caen hasta los 2 segundos en las más altas.

En las figuras IV.2.2.12 y IV.2.2.13 se muestran las gráficas por zonas para cada una de las posiciones de fuente y bandas de frecuencia. Se aprecian algunas diferencias entre las zonas estudiadas siendo los valores ligeramente superiores en las capillas y las tribunas, y más bajos en el transepto y el ábside, el descenso de valores en el ábside es más acusado cuando la fuente se encuentra en el altar. Se puede comprobar que a frecuencias medias el modelo se encuentra ajustado, encontrando las mayores diferencias desde el punto de vista de la fuente a frecuencias bajas y a 2000 Hz en cuanto a la calibración.

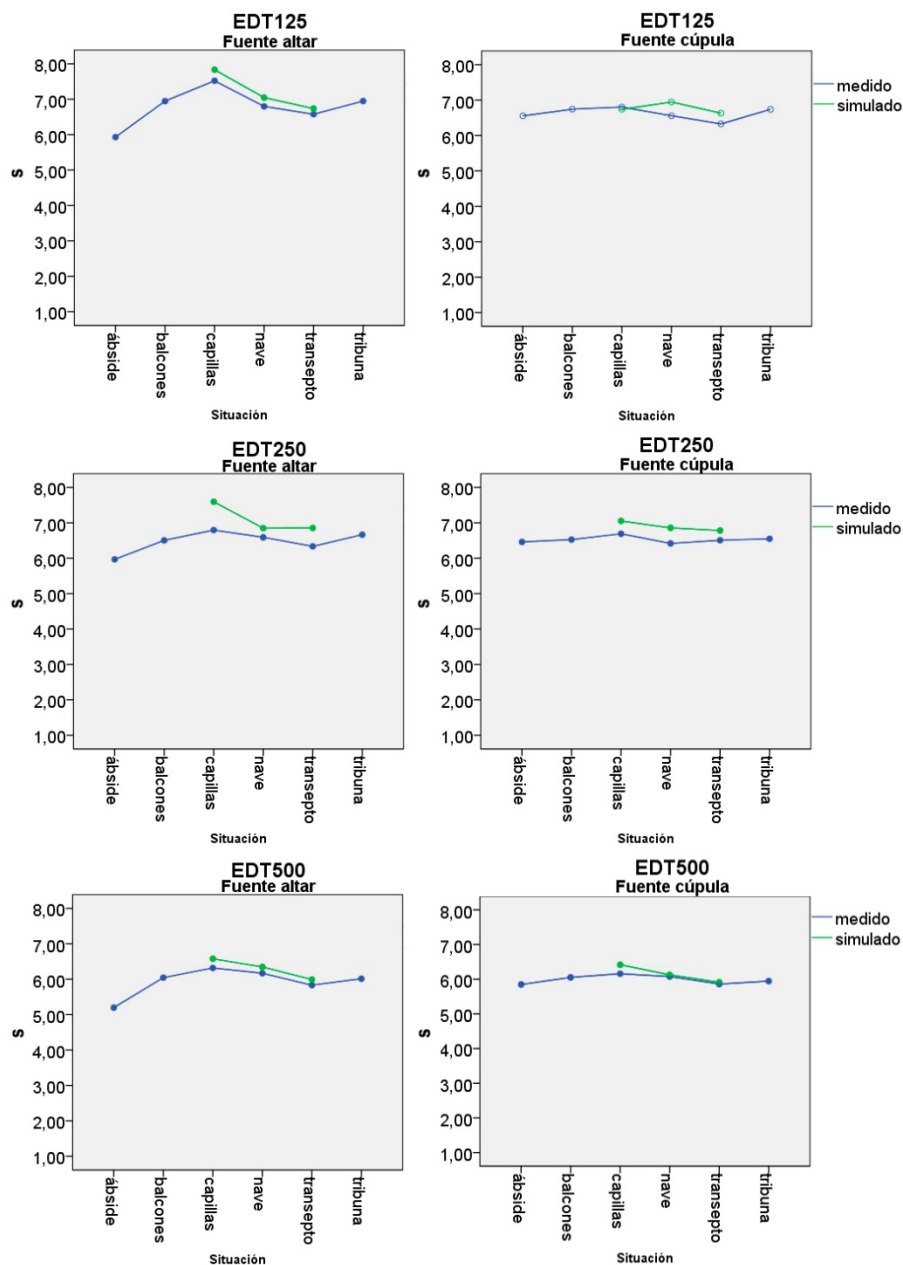


Figura IV.2.2.12. Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

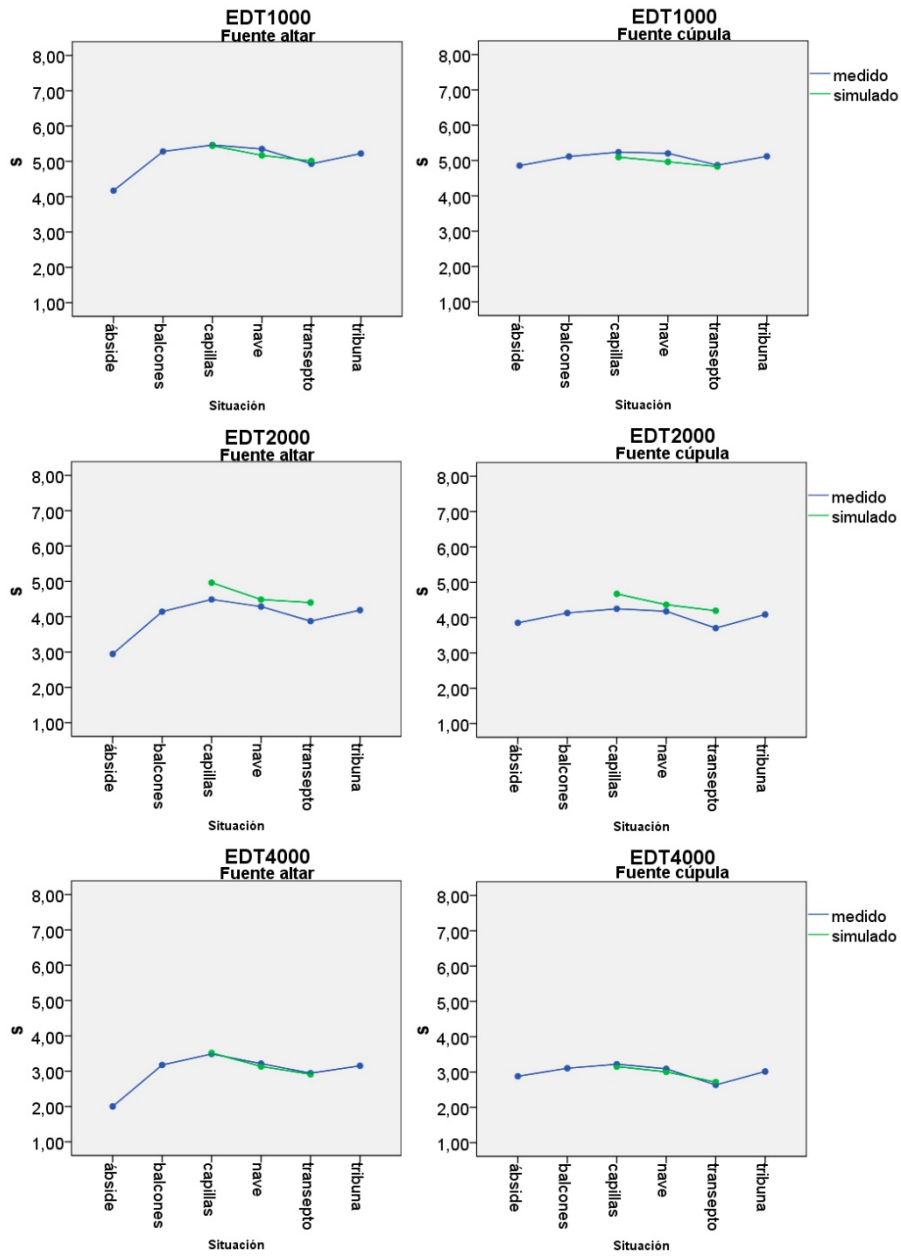


Figura IV.2.2.13. Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.5. Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuencia	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med_sim		med_sim								
			medido	sim	medido	sim							
EDT125	ábside	altar	5,933		0,272		-0,623	0,107	2,10				
		cúpula	6,555		0,272								
	balcones	altar	6,948		0,119		0,204	0,227	0,59				
		cúpula	6,744		0,119								
	capillas	altar	7,521	7,835	0,206	0,272	0,717	<0,001	1,91	-0,314	0,341	0,83	
		cúpula	6,804	6,740	0,206	0,272				0,064	0,341	0,19	
	nave	altar	6,798	7,048	0,105	0,105	0,240	0,104	0,71	-0,250	0,148	0,74	
		cúpula	6,558	6,946	0,105	0,105				-0,388	0,148	1,18	
	transepto	altar	6,576	6,735	0,157	0,222	0,249	0,359	0,76	-0,159	0,272	0,48	
		cúpula	6,327	6,630	0,157	0,222				-0,303	0,272	0,96	
	tribuna	altar	6,949		0,157		0,211	0,344	0,61				
		cúpula	6,738		0,157								
	EDT250	ábside	altar	5,968		0,202		-0,493	0,087	1,65			
			cúpula	6,460		0,202							
balcones		altar	6,505		0,088		-0,021	0,867	0,06				
		cúpula	6,526		0,088								
capillas		altar	6,796	7,595	0,153	0,202	0,106	0,072	0,31	-0,799	0,002	2,35	
		cúpula	6,690	7,053	0,153	0,202				-0,362	0,155	1,08	
nave		altar	6,590	6,850	0,078	0,078	0,173	0,287	0,52	-0,260	0,019	0,79	
		cúpula	6,417	6,857	0,078	0,078				-0,440	<0,001	1,37	
transepto		altar	6,335	6,855	0,117	0,165	-0,172	0,725	0,54	-0,520	0,011	1,64	
		cúpula	6,507	6,783	0,117	0,165				-0,276	0,174	0,85	
tribuna		altar	6,665		0,117		0,117	0,481	0,35				
		cúpula	6,548		0,117								
EDT500		ábside	altar	5,198		0,142		-0,650	0,001	2,50			
			cúpula	5,848		0,142							
	balcones	altar	6,045		0,062		-0,007	0,935	0,02				
		cúpula	6,052		0,062								
	capillas	altar	6,319	6,578	0,107	0,142	0,160	0,203	0,51	-0,259	0,146	0,82	
		cúpula	6,159	6,418	0,107	0,142				-0,259	0,146	0,84	
	nave	altar	6,168	6,346	0,054	0,054	0,093	0,004	0,30	-0,178	0,022	0,58	
		cúpula	6,075	6,126	0,054	0,054				-0,051	0,511	0,17	
	transepto	altar	5,833	5,992	0,082	0,116	-0,027	0,787	0,09	-0,159	0,262	0,55	
		cúpula	5,860	5,910	0,082	0,116				-0,050	0,724	0,17	
	tribuna	altar	6,012		0,082		0,068	0,555	0,23				
		cúpula	5,944		0,082								
	EDT1000	ábside	altar	4,173		0,146		-0,683	0,001	3,27			
			cúpula	4,855		0,146							
balcones		altar	5,280		0,064		0,167	0,066	0,63				
		cúpula	5,113		0,064								
capillas		altar	5,464	5,443	0,111	0,146	0,226	0,028	0,83	0,022	0,906	0,08	
		cúpula	5,239	5,095	0,111	0,146				0,144	0,435	0,55	
nave		altar	5,351	5,170	0,056	0,056	0,148	0,002	0,55	0,181	0,024	0,68	
		cúpula	5,203	4,962	0,056	0,056				0,241	0,003	0,93	
transepto		altar	4,932	5,010	0,084	0,119	0,062	0,246	0,25	-0,078	0,593	0,32	
		cúpula	4,869	4,832	0,084	0,119				0,037	0,798	0,15	
tribuna		altar	5,223		0,084		0,104	0,384	0,40				
		cúpula	5,118		0,084								

Tabla IV.2.2.6. Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuencia	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	P	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
			medido	sim	medido	sim						
EDT2000	ábside	altar	2,945		0,130		-0,905	<0,001	6,15			
		cúpula	3,850		0,130							
	balcones	altar	4,142		0,057		0,012	0,877	0,06			
		cúpula	4,130		0,057							
	capillas	altar	4,489	4,963	0,098	0,130	0,240	0,022	1,07	-0,474	0,004	2,11
		cúpula	4,249	4,670	0,098	0,130				-0,421	0,010	1,98
	nave	altar	4,286	4,486	0,050	0,050	0,109	0,022	0,51	-0,200	0,005	0,93
		cúpula	4,176	4,364	0,050	0,050				-0,187	0,009	0,90
	transepto	altar	3,875	4,400	0,075	0,106	0,173	0,039	0,89	-0,525	<0,001	2,71
		cúpula	3,702	4,193	0,075	0,106				-0,492	<0,001	2,66
	tribuna	altar	4,186		0,075		0,100	0,346	0,48			
		cúpula	4,086		0,075							
EDT4000	ábside	altar	2,000		0,110		-0,880	<0,001	8,80			
		cúpula	2,880		0,110							
	balcones	altar	3,175		0,048		0,069	0,313	0,43			
		cúpula	3,107		0,048							
	capillas	altar	3,486	3,515	0,083	0,110	0,264	0,002	1,52	-0,029	0,832	0,17
		cúpula	3,221	3,155	0,083	0,110				0,066	0,630	0,41
	nave	altar	3,213	3,133	0,042	0,042	0,123	0,003	0,76	0,080	0,185	0,50
		cúpula	3,090	3,005	0,042	0,042				0,085	0,156	0,55
	transepto	altar	2,943	2,912	0,063	0,090	0,308	0,001	2,10	0,032	0,774	0,22
		cúpula	2,635	2,715	0,063	0,090				-0,080	0,467	0,61
	tribuna	altar	3,152		0,063		0,136	0,132	0,86			
		cúpula	3,016		0,063							
EDT8000	ábside	altar	1,195		0,122		-0,945	0,000	15,82			
		cúpula	2,140		0,122							
	balcones	altar	2,097		0,053		-0,177	0,019	1,69			
		cúpula	2,274		0,053							
	capillas	altar	2,300		0,092		-0,024	0,553	0,21			
		cúpula	2,324		0,092							
	nave	altar	2,130		0,047		-0,110	0,008	1,04			
		cúpula	2,240		0,047							
	transepto	altar	1,952		0,070		0,157	0,004	1,61			
		cúpula	1,795		0,070							
	tribuna	altar	2,058		0,070		-0,088	0,375	0,86			
		cúpula	2,146		0,070							

La tabla IV.2.2.5 muestra la comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en el ábside y las capillas, llegando al máximo de 0,7 segundos en las capillas a 125 Hz para un valor medido de 7,52.

Existe diferencia estadísticamente significativa en los casos aislados, que coinciden con las capillas a frecuencias muy bajas, y el ábside y la nave a medias-bajas.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND únicamente en el ábside a todas las frecuencias y en las capillas a 125 Hz. Las diferencias en el ábside son probablemente debidas a la gran proximidad con la fuente cuando se sitúa en el altar y no al comportamiento de la sala.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real oscilan en su mayoría en torno a 0,2-0,3 segundos. Los mayores valores se encuentran en las capillas a frecuencias bajas, el valor máximo alcanzado es de 0,799 segundos localizado a 250 Hz con la fuente en el altar.

Existe diferencia estadísticamente significativa en la nave para las frecuencias comprendidas entre 250 y 1000 Hz.

En términos de percepción, se superan ligeramente los 2 JND de diferencia entre valores medidos y simulados en un caso aislado en las capillas y para una sola posición de fuente por lo que se considera despreciable.

La tabla IV.2.2.6 muestra la comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares. En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran de nuevo en el ábside y las capillas, y aumentan en el transepto con la frecuencia.

A diferencia de lo que ocurría a frecuencias bajas y medias, existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores medidos en la mayoría de casos.

No obstante, en términos de percepción, existen diferencias superiores a 1 JND en el ábside y las capillas a todas las frecuencias y también en los balcones, nave y transepto a la frecuencia de 8000 Hz.

En cuanto a la calibración del modelo, los resultados son similares a los obtenidos a frecuencias medias y bajas, no obstante, se superan los 2 JND de diferencia en el transepto y las capillas a 2000 Hz.

Los resultados muestran una mayor sensibilidad del parámetro EDT a la posición de la fuente sonora, encontrando diferencias en la zona de las capillas y el ábside aunque en este último caso probablemente sea debido a la

proximidad fuente-receptor. El modelo puede considerarse bien calibrado en lo referente a este parámetro ya que en el 89% de los casos las diferencias entre valores medidos y simulados se encuentran por debajo de los 2 JND.

Se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares, (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) e estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009). El rango de valores para el tiempo de caída inicial es de un máximo de 8,8 segundos y un mínimo de 4 segundos, siendo el valor medio igual a 5,56 segundos, por lo que la Basílica de Santa María se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose en la media.

IV.2.2.4.2. Parámetros de energía

La caracterización de la sala desde el punto de vista energético se ha realizado mediante los parámetros de claridad del habla y musical C50 y C80, el tiempo central T_s y la fuerza G . Los parámetros energéticos son determinantes para el estudio de la transparencia, relacionada con la intensidad relativa del sonido. Es una propiedad en la que influyen de manera importante las reflexiones en las que la trayectoria entre fuente y receptor es corta.

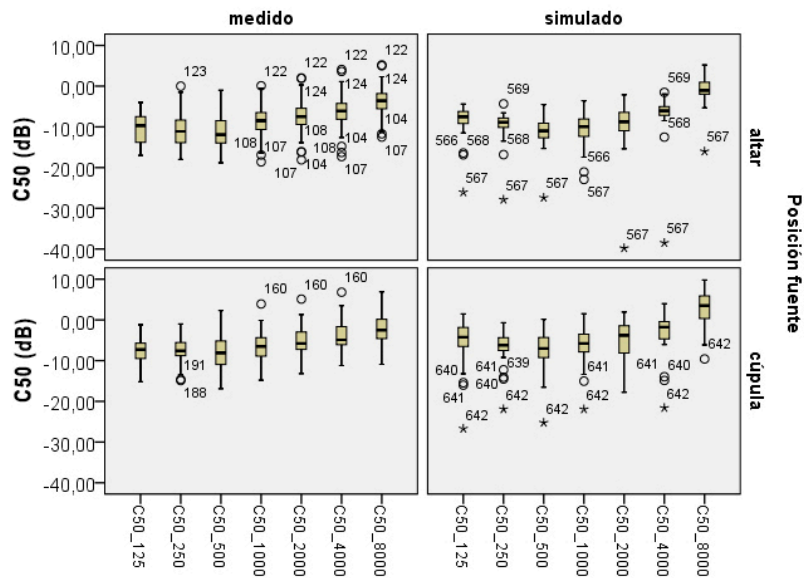


Figura IV.2.2.14. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C50 por frecuencias.

La figura IV.2.2.14 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro C50. En este caso, los valores muestran mayor dispersión, sobre todo a frecuencias medias, y mayor presencia de puntos espurios, especialmente para la fuente en el altar.

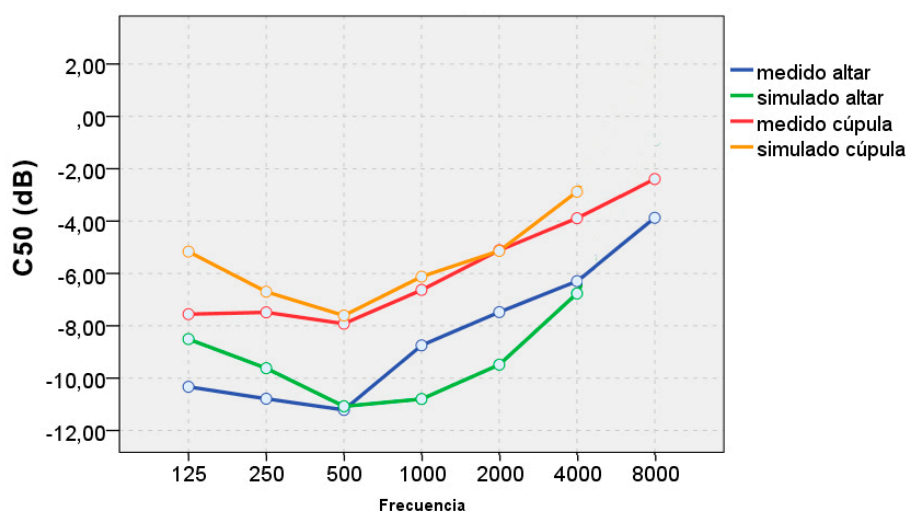


Figura IV.2.2.15. Valores de C50 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.2.15 muestra los valores de C50 promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. A diferencia de lo que ocurría con los parámetros de reverberación, se observan diferencias importantes entre fuentes a todas las frecuencias, y en menor medida entre valores medidos y simulados a frecuencias bajas y a 1000 y 2000 Hz cuando la fuente está en el altar.

En las figuras IV.2.2.16 y IV.2.2.17 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores de C50 son menores en las capillas a todas las frecuencias. En la nave y el transepto se obtienen los mejores valores, siendo ligeramente superiores en el segundo. Esto sea probablemente debido a que la profundidad de la nave es mayor por lo que los receptores situados en las últimas filas que se encuentran a más distancia de la fuente, provocan un descenso del valor medio en esta zona.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que aunque hay más diferencia que en los parámetros de reverberación, la tendencia es muy similar

en ambos casos. Los buenos resultados que se obtienen en el ábside para la fuente en el altar son debidos a su proximidad.

En cuanto a la calibración, cabe destacar a frecuencias bajas la zona de las capillas es la peor ajustada mientras que a medias y altas se aproxima. En el caso de la zona de la nave la diferencia se mantiene constante a frecuencias bajas y medias y mejora a altas, mientras que el transepto muestra buenos resultados en todos los casos. La simulación con la fuente bajo la cúpula se ajusta mejor.

La tabla IV.2.2.7 muestra la comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a Frecuencias de 125 a 1000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias superan los 7 dB y se encuentran en el ábside a 500 y 1000 Hz. Existen diferencias importantes en la nave, donde a 500 Hz se alcanzan los 6 dB de diferencia para un valor medido de -14 dB, mientras que en el resto de las zonas se sitúan entre 2-3 dB a frecuencias medias y 3-4 dB a bajas.

Existe diferencia estadísticamente significativa en la nave a todas las frecuencias, en el ábside en casi todos los casos, y en el transepto y tribunas a frecuencias medias.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND en todos los casos excepto en la zona de los balcones, alcanzando los 4 JND en la nave y 5 JND en el ábside.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real varían mucho con la zona y la frecuencia. A frecuencias bajas se observan grandes diferencias en las capillas llegando a los 7 dB, diferencias intermedias en la nave en torno a los 2 dB y alrededor de 1 dB en el transepto. A frecuencias medias la diferencia en las capillas disminuye igualándose con la nave en valores de unos 3 dB.

Existe diferencia estadísticamente significativa a 125 y 1000 Hz en las capillas y a todas las frecuencias en la nave para la fuente en el altar.

En términos de percepción, se superan los 2 JND en las capillas a todas las frecuencias para la fuente en la cúpula y a 125 y 1000 también para la fuente en el altar, y en la nave a 250 y 500 Hz para la fuente en la cúpula. No obstante, en la nave se supera ligeramente dicho valor.

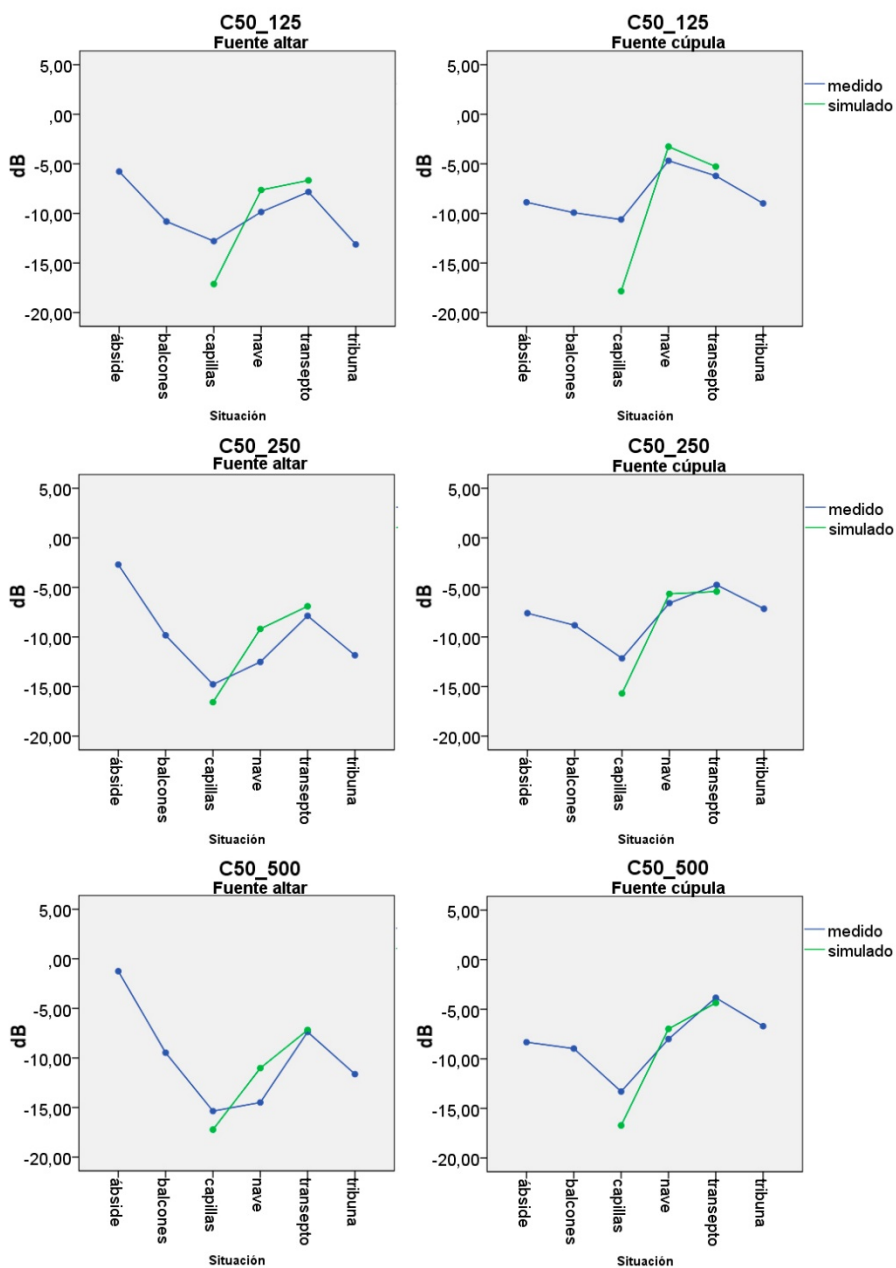


Figura IV.2.2.16. Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

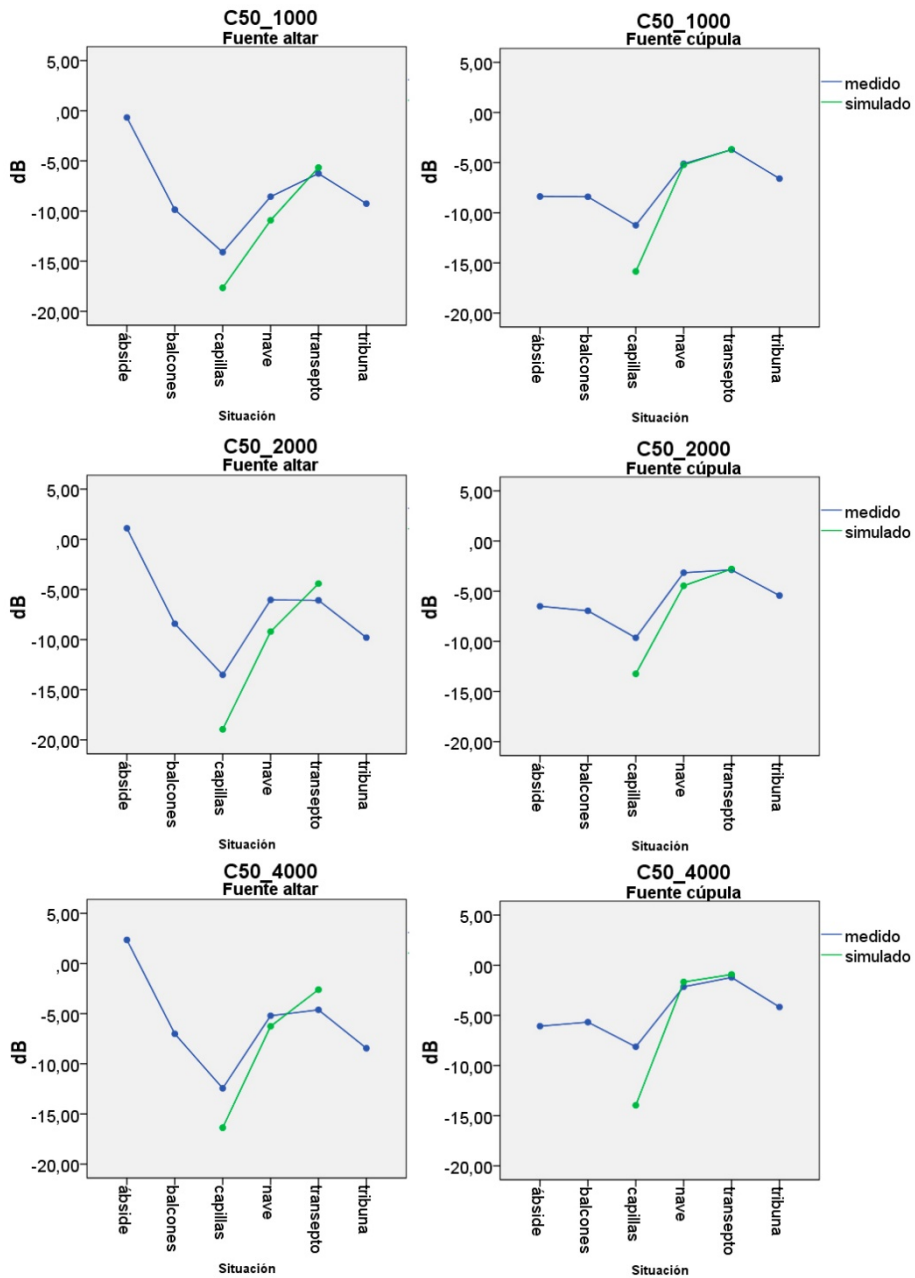


Figura IV.2.2.17. Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.7. Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med_sim		med_sim								
			medido	sim	medido	sim							
C50_125	ábside	altar	-5,775		1,422		3,100	0,125	2,07				
		cúpula	-8,875		1,422								
	balcones	altar	-10,814		0,621		-0,890	0,312	0,59				
		cúpula	-9,924		0,621								
	capillas	altar	-12,800	-17,125	1,075	1,422	-2,186	0,561	1,46	4,325	0,016	2,88	
		cúpula	-10,614	-17,843	1,075	1,422				7,228	<0,001	4,82	
	nave	altar	-9,852	-7,639	0,547	0,547	-5,167	<0,001	3,44	-2,213	0,005	1,48	
		cúpula	-4,685	-3,262	0,547	0,547				-1,423	0,067	0,95	
	transepto	altar	-7,833	-6,670	0,821	1,161	-1,617	0,137	1,08	-1,163	0,414	0,78	
		cúpula	-6,217	-5,282	0,821	1,161				-0,935	0,512	0,62	
	tribuna	altar	-13,133		0,821		-4,150	<0,001	2,77				
		cúpula	-8,983		0,821								
C50_250	ábside	altar	-2,700		1,298		4,900	0,008	3,27				
		cúpula	-7,600		1,298								
	balcones	altar	-9,833		0,567		-1,010	0,209	0,67				
		cúpula	-8,824		0,567								
	capillas	altar	-14,786	-16,578	0,981	1,298	-2,629	0,128	1,75	1,792	0,272	1,19	
		cúpula	-12,157	-15,693	0,981	1,298				3,535	0,031	2,36	
	nave	altar	-12,519	-9,194	0,500	0,500	-5,937	<0,001	3,96	-3,324	<0,001	2,22	
		cúpula	-6,581	-5,653	0,500	0,500				-0,929	0,190	0,62	
	transepto	altar	-7,867	-6,903	0,750	1,060	-3,125	0,013	2,08	-0,963	0,459	0,64	
		cúpula	-4,742	-5,412	0,750	1,060				0,670	0,606	0,45	
	tribuna	altar	-11,842		0,750		-4,683	<0,001	3,12				
		cúpula	-7,158		0,750								
C50_500	ábside	altar	-1,250		1,428		7,075	0,001	4,72				
		cúpula	-8,325		1,428								
	balcones	altar	-9,471		0,623		-0,505	0,567	0,34				
		cúpula	-8,967		0,623								
	capillas	altar	-15,357	-17,233	1,080	1,428	-2,057	0,312	1,37	1,875	0,296	1,25	
		cúpula	-13,300	-16,723	1,080	1,428				3,423	0,057	2,28	
	nave	altar	-14,489	-11,030	0,550	0,550	-6,485	<0,001	4,32	-3,459	<0,001	2,31	
		cúpula	-8,004	-6,980	0,550	0,550				-1,024	0,189	0,68	
	transepto	altar	-7,375	-7,178	0,825	1,166	-3,533	0,002	2,36	-0,197	0,891	0,13	
		cúpula	-3,842	-4,365	0,825	1,166				0,523	0,714	0,35	
	tribuna	altar	-11,633		0,825		-4,925	<0,001	3,28				
		cúpula	-6,708		0,825								
C50_1000	ábside	altar	-0,675		1,383		7,700	<0,001	5,13				
		cúpula	-8,375		1,383								
	balcones	altar	-9,862		0,604		-1,462	0,088	0,97				
		cúpula	-8,400		0,604								
	capillas	altar	-14,100	-17,655	1,045	1,383	-2,857	0,059	1,90	3,555	0,041	2,37	
		cúpula	-11,243	-15,850	1,045	1,383				4,607	0,008	3,07	
	nave	altar	-8,567	-10,923	0,532	0,532	-3,448	<0,001	2,30	2,356	0,002	1,57	
		cúpula	-5,119	-5,221	0,532	0,532				0,103	0,691	0,07	
	transepto	altar	-6,258	-5,667	0,798	1,129	-2,550	0,022	1,70	-0,592	0,669	0,39	
		cúpula	-3,708	-3,693	0,798	1,129				-0,015	0,691	0,01	
	tribuna	altar	-9,258		0,798		-2,667	0,019	1,78				
		cúpula	-6,592		0,798								

Tabla IV.2.2.8. Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	P	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			medido	sim	medido	sim						
C50_2000	ábside	altar	1,100		1,548		7,600	0,001	5,07			
		cúpula	-6,500		1,548							
	balcones	altar	-8,414		0,675		-1,457	0,129	0,97			
		cúpula	-6,957		0,675							
	capillas	altar	-13,514	-18,948	1,170	1,548	-3,871	0,001	2,58	5,433	0,006	3,62
		cúpula	-9,643	-13,240	1,170	1,548				3,597	0,065	2,40
	nave	altar	-6,041	-9,207	0,596	0,596	-2,885	<0,001	1,92	3,166	<0,001	2,11
		cúpula	-3,156	-4,460	0,596	0,596				1,304	0,123	0,87
	transepto	altar	-6,083	-4,420	0,894	1,264	-3,208	0,028	2,14	-1,663	0,284	1,11
		cúpula	-2,875	-2,787	0,894	1,264				-0,088	0,955	0,06
	tribuna	altar	-9,800		0,894		-4,367	0,001	2,91			
		cúpula	-5,433		0,894							
C50_4000	ábside	altar	2,350		1,530		8,425	<0,001	5,62			
		cúpula	-6,075		1,530							
	balcones	altar	-7,014		0,668		-1,338	0,158	0,89			
		cúpula	-5,676		0,668							
	capillas	altar	-12,443	-17,655	1,157	1,530	-4,314	0,014	2,88	5,212	0,042	3,47
		cúpula	-8,129	-13,965	1,157	1,530				5,836	0,003	3,89
	nave	altar	-5,207	-6,263	0,589	0,589	-3,059	<0,001	2,04	1,056	0,206	0,70
		cúpula	-2,148	-1,670	0,589	0,589				-0,478	0,566	0,32
	transepto	altar	-4,625	-2,608	0,883	1,249	-3,408	0,019	2,27	-2,017	0,189	1,34
		cúpula	-1,217	-0,922	0,883	1,249				-0,295	0,847	0,20
	tribuna	altar	-8,450		0,883		-4,283	0,001	2,86			
		cúpula	-4,167		0,883							
C50_8000	ábside	altar	3,625		1,265		7,975	<0,001	5,32			
		cúpula	-4,350		1,265							
	balcones	altar	-5,090		0,552		-0,086	0,913	0,06			
		cúpula	-5,005		0,552							
	capillas	altar	-8,943		0,956		-2,100	0,403	1,40			
		cúpula	-6,843		0,956							
	nave	altar	-3,067		0,487		-3,137	<0,001	2,09			
		cúpula	0,070		0,487							
	transepto	altar	-2,950		0,730		-2,358	0,078	1,57			
		cúpula	-0,592		0,730							
	tribuna	altar	-4,025		0,730		-2,117	0,042	1,41			
		cúpula	-1,908		0,730							

La tabla IV.2.2.8 muestra la comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a Frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares. En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran de nuevo en el ábside, alcanzando el máximo de 8,4 dB a 4000 Hz. Son también considerables en la tribuna y las capillas, en torno a los 3-4 dB.

A diferencia de lo que ocurría a frecuencias bajas y medias, existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores medidos en la mayoría de casos.

Al igual que ocurría a frecuencias bajas y medias, existen diferencias superiores a 1 JND en todos los casos excepto en los balcones.

En cuanto a la calibración del modelo, las mayores diferencias se obtienen de nuevo en las capillas, con valores que alcanzan los 5 dB. Mientras que en la nave y el transepto se encuentran entorno a 1 dB. Existe diferencia estadísticamente significativa en las tres zonas a 2000 Hz y en las capillas también a 4000 Hz. Se superan los 2 JND en las capillas a todas las frecuencias.

Los resultados muestran una considerable sensibilidad del parámetro C50 a la posición de la fuente sonora, encontrando diferencias en la zona de las capillas y el ábside, aunque en este último caso probablemente sea debido a la proximidad fuente-receptor. La simulación es buena en la nave y el transepto, pero mala en las capillas, en el 64% de los casos las diferencias entre valores medidos y simulados se encuentran por debajo de los 2 JND.

Como ya se ha comentado el parámetro C50 mide la proporción efectiva de las primeras reflexiones para la palabra y hace referencia a la capacidad de discriminar adecuadamente las sílabas en una palabra. Se considera que la claridad es excelente cuando el valor es superior a 7 dB, buena cuando se encuentra entre 2 y 7 dB, aceptable cuando está entre -2 y 2 dB, pobre para valores entre -7 y -2 dB y mala cuando es inferior a -7 dB (Barba, 2016), por lo que en este caso se puede considerar pobre en el transepto y las tribunas, y mala en el resto de zonas.

Los valores obtenidos en la Basílica para el Misteri se encuentran en su mayoría. La claridad del sonido es por tanto muy baja dado que, como se ha comentado anteriormente, la reverberación es alta y la inteligibilidad mala, por lo que será difícil la comprensión del habla.

Se ha realizado el mismo análisis para el caso de la música.

La figura IV.2.2.18 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro C80. El comportamiento es muy similar al del parámetro C50, los valores muestran mayor dispersión que en el caso de los parámetros de reverberación. Existen algunos puntos espurios pero son casos aislados y que no difieren excesivamente de la tendencia generalizada.

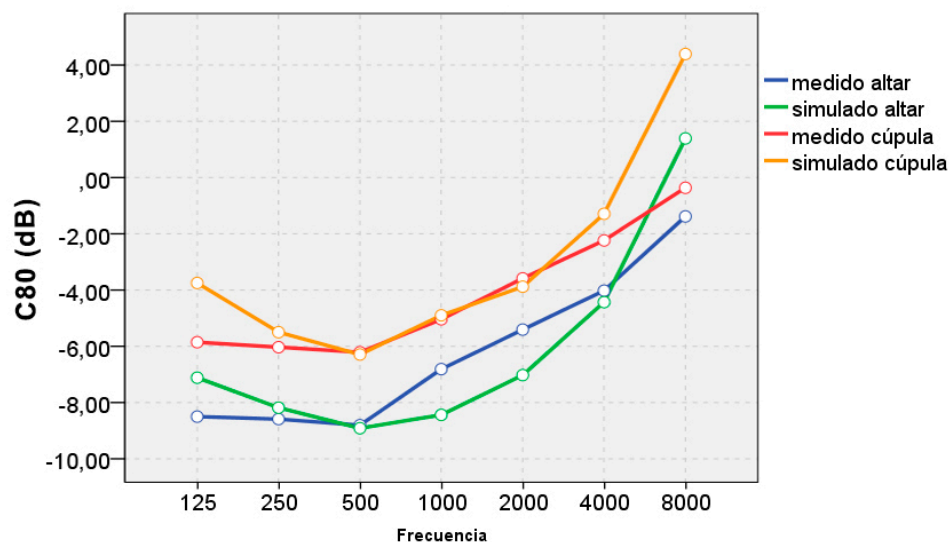


Figura IV.2.2.19. Valores de C80 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

En las figuras IV.2.2.20 y IV.2.2.21 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Al igual que en el caso anterior, los valores de C80 son menores en las capillas a todas las frecuencias. Los mejores resultados se han obtenido en la nave y el transepto con valores semejantes, siendo ligeramente superiores en el segundo. Esto sea probablemente debido a que la profundidad de la nave es mayor por lo que los receptores situados en las últimas filas que se encuentran a más distancia de la fuente, provocan un descenso del valor medio en esta zona. La tribuna y los balcones presentan valores intermedios.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que aunque hay más diferencia que en los parámetros de reverberación, la tendencia es muy similar en ambos casos. Los buenos resultados que se obtienen en el ábside para la fuente en el altar son debidos a su proximidad.

En cuanto a la calibración, cabe destacar que la zona de las capillas muestra malos resultados a frecuencias altas mientras que el transepto es la zona mejor ajustada. La aproximación a la realidad es mayor para la simulación realizada con la fuente en la cúpula.

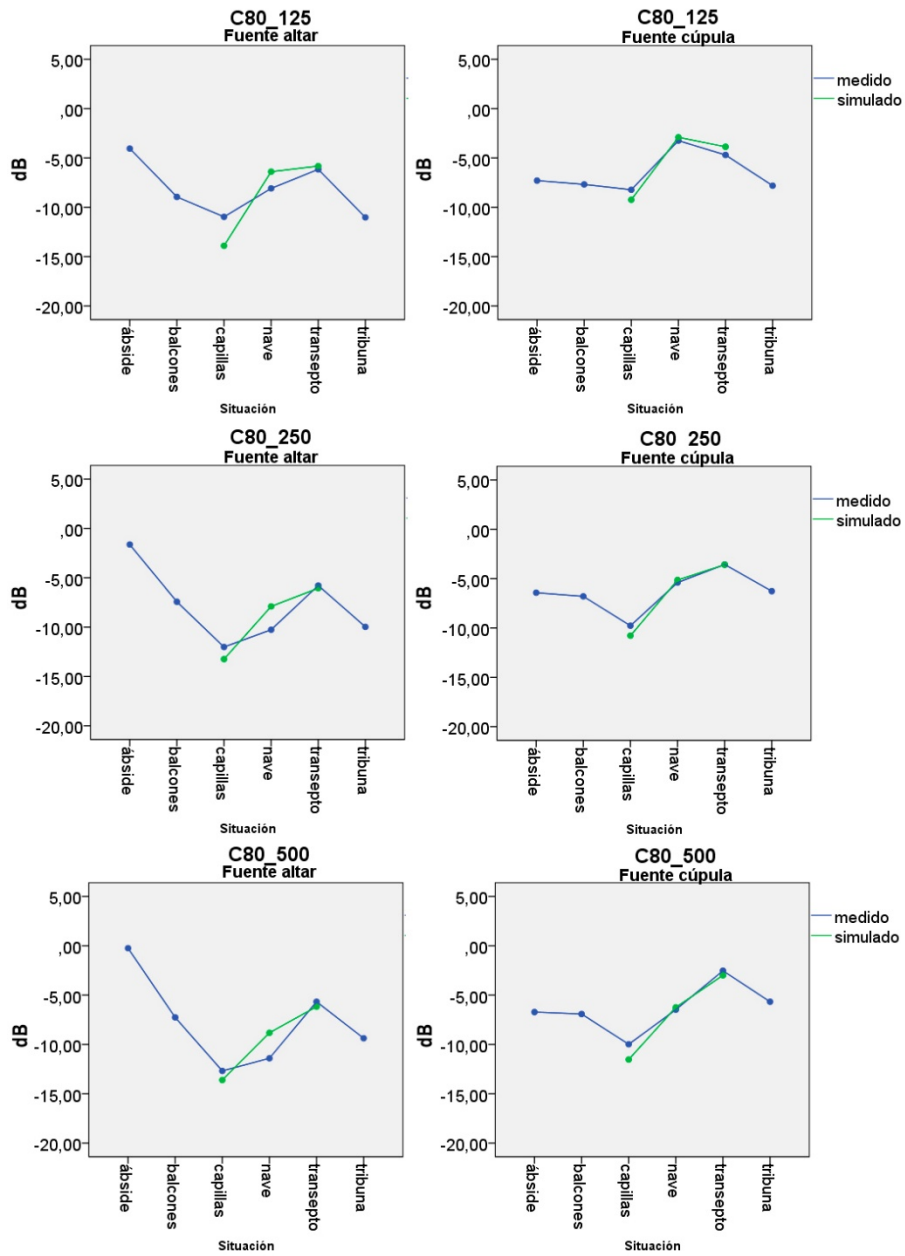


Figura IV.2.2.20. Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

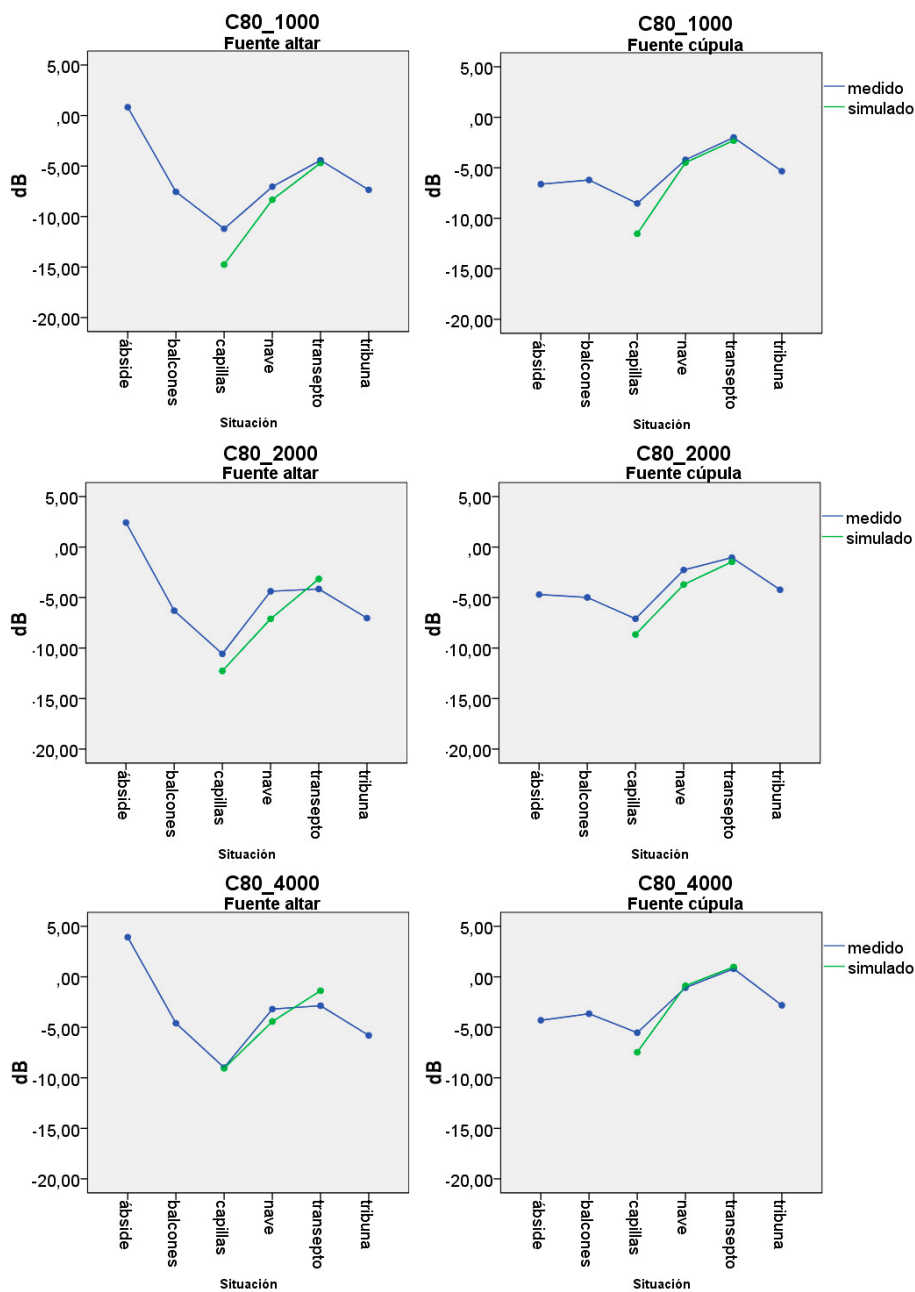


Figura IV.2.2.21. Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.9. Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			medido	sim	medido	sim							
C80_125	ábside	altar	-4,050		1,141		3,250	0,045	2,17				
		cúpula	-7,300		1,141								
	balcones	altar	-8,948		0,498		-1,262	0,075	0,84				
		cúpula	-7,686		0,498								
	capillas	altar	-10,971	-13,903	0,863	1,141	-2,743	<0,001	1,83	2,931	0,042	1,95	
		cúpula	-8,229	-9,238	0,863	1,141				1,009	0,481	0,67	
	nave	altar	-8,089	-6,395	0,439	0,439	-4,841	<0,001	3,23	-1,694	0,007	1,13	
		cúpula	-3,248	-2,910	0,439	0,439				-0,339	0,586	0,23	
	transepto	altar	-6,158	-5,828	0,659	0,932	-1,458	0,035	0,97	-0,330	0,733	0,22	
		cúpula	-4,700	-3,870	0,659	0,932				-0,830	0,466	0,55	
	tribuna	altar	-11,025		0,659		-3,208	0,001	2,14				
		cúpula	-7,817		0,659								
	C80_250	ábside	altar	-1,625		1,067		4,800	0,002	3,20			
			cúpula	-6,425		1,067							
balcones		altar	-7,429		0,466		-0,633	0,337	0,42				
		cúpula	-6,795		0,466								
capillas		altar	-12,014	-13,245	0,807	1,067	-2,243	0,013	1,50	1,231	0,359	0,82	
		cúpula	-9,771	-10,775	0,807	1,067				1,004	0,454	0,67	
nave		altar	-10,267	-7,904	0,411	0,411	-4,870	<0,001	3,25	-2,362	<0,001	1,57	
		cúpula	-5,396	-5,139	0,411	0,411				-0,257	0,656	0,17	
transepto		altar	-5,783	-6,058	0,616	0,871	-2,217	0,002	1,48	0,275	0,797	0,18	
		cúpula	-3,567	-3,595	0,616	0,871				0,028	0,979	0,02	
tribuna		altar	-9,975		0,616		-3,708	<0,001	2,47				
		cúpula	-6,267		0,616								
C80_500		ábside	altar	-0,250		1,183		6,475	<0,001	4,32			
			cúpula	-6,725		1,183							
	balcones	altar	-7,262		0,516		-0,343	0,639	0,23				
		cúpula	-6,919		0,516								
	capillas	altar	-12,686	-13,608	0,894	1,183	-2,700	0,024	1,80	0,922	0,535	0,61	
		cúpula	-9,986	-11,533	0,894	1,183				1,547	0,296	1,03	
	nave	altar	-11,407	-8,824	0,455	0,455	-4,930	<0,001	3,29	-2,583	<0,001	1,72	
		cúpula	-6,478	-6,247	0,455	0,455				-0,230	0,721	0,15	
	transepto	altar	-5,675	-6,175	0,683	0,966	-3,142	<0,001	2,09	0,500	0,673	0,33	
		cúpula	-2,533	-2,998	0,683	0,966				0,465	0,685	0,31	
	tribuna	altar	-9,375		0,683		-3,700	<0,001	2,47				
		cúpula	-5,675		0,683								
	C80_1000	ábside	altar	0,825		1,168		7,450	<0,001	4,97			
			cúpula	-6,625		1,168							
balcones		altar	-7,552		0,510		-1,343	0,064	0,90				
		cúpula	-6,210		0,510								
capillas		altar	-11,214	-14,755	0,883	1,168	-2,686	0,005	1,79	3,541	0,016	2,36	
		cúpula	-8,529	-11,528	0,883	1,168				2,999	0,042	2,00	
nave		altar	-7,044	-8,333	0,450	0,450	-2,833	<0,001	1,89	1,288	0,044	0,86	
		cúpula	-4,211	-4,493	0,450	0,450				0,282	0,656	0,19	
transepto		altar	-4,425	-4,702	0,675	0,954	-2,425	0,004	1,62	0,277	0,813	0,18	
		cúpula	-2,000	-2,297	0,675	0,954				0,297	0,600	0,20	
tribuna		altar	-7,358		0,675		-2,017	0,036	1,34				
		cúpula	-5,342		0,675								

Tabla IV.2.2.10. Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
			medido	sim	medido	sim						
C80_2000	ábside	altar	2,425		1,157		7,125	<0,001	4,75			
		cúpula	-4,700		1,157							
	balcones	altar	-6,295		0,505		-1,310	0,068	0,87			
		cúpula	-4,986		0,505							
	capillas	altar	-10,571	-12,260	0,875	1,157	-3,471	0,001	2,31	1,689	0,246	1,13
		cúpula	-7,100	-8,655	0,875	1,157				1,555	0,295	1,04
	nave	altar	-4,378	-7,111	0,445	0,445	-2,111	<0,001	1,41	2,734	<0,001	1,82
		cúpula	-2,267	-3,713	0,445	0,445				1,446	0,023	0,96
	transepto	altar	-4,150	-3,158	0,668	0,945	-3,108	0,004	2,07	-0,992	0,392	0,66
		cúpula	-1,042	-1,460	0,668	0,945				0,418	0,718	0,28
	tribuna	altar	-7,033		0,668		-2,808	0,003	1,87			
		cúpula	-4,225		0,668							
C80_4000	ábside	altar	3,925		1,093		8,225	<0,001	5,48			
		cúpula	-4,300		1,093							
	balcones	altar	-4,590		0,477		-0,938	0,166	0,63			
		cúpula	-3,652		0,477							
	capillas	altar	-8,986	-9,045	0,826	1,093	-3,457	0,010	2,30	0,059	0,966	0,04
		cúpula	-5,529	-7,460	0,826	1,093				1,931	0,160	1,29
	nave	altar	-3,193	-4,422	0,421	0,421	-2,122	<0,001	1,41	1,230	0,040	0,82
		cúpula	-1,070	-0,879	0,421	0,421				-0,192	0,747	0,13
	transepto	altar	-2,858	-1,375	0,631	0,892	-3,658	<0,001	2,44	-1,483	0,176	0,99
		cúpula	0,800	0,978	0,631	0,892				-0,178	0,870	0,12
	tribuna	altar	-5,800		0,631		-2,983	0,001	1,99			
		cúpula	-2,817		0,631							
C80_8000	ábside	altar	5,875		1,040		8,100	<0,001	5,40			
		cúpula	-2,225		1,040							
	balcones	altar	-2,410		0,454		-0,052	0,935	0,03			
		cúpula	-2,357		0,454							
	capillas	altar	-5,643		0,786		-1,586	0,283	1,06			
		cúpula	-4,057		0,786							
	nave	altar	-0,774		0,400		-2,156	<0,001	1,44			
		cúpula	1,381		0,400							
	transepto	altar	-0,592		0,600		-2,617	0,003	1,74			
		cúpula	2,025		0,600							
	tribuna	altar	-1,692		0,600		-1,283	0,132	0,86			
		cúpula	-0,408		0,600							

La tabla IV.2.2.9 muestra la comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a Frecuencias de 125 a 1000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en el ábside y la nave con valores que alcanzan los 7 dB en el primer caso y casi 5 en el segundo, frente a los 2-3 dB de las capillas, transepto y tribuna, siendo los balcones la zona con menor variación.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos excepto en los balcones.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND en todos los casos excepto en los balcones, con valores del orden de 2-3 JND casi llegando a 5dB en un caso en el ábside.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real, son del orden de 1-2 dB, se dan en las capillas y la nave, mientras que en el transepto no se alcanza 1 dB.

Existe diferencia estadísticamente significativa en varios casos en las capillas y en la nave para la fuente en el altar.

En términos de percepción, se superan los 2 JND únicamente en las capillas a 1000 Hz, sobrepasando el valor máximo ligeramente (2,36 dB) por lo que se puede considerar que la simulación es válida.

La tabla IV.2.2.10 muestra la comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares, con las principales diferencias debidas a la posición de la fuente en el ábside, y superando 1 JND en todas las zonas excepto los balcones.

Para este rango de frecuencias, la simulación es también válida sin superar los 2 JND en ningún caso.

El parámetro C80 evalúa el grado de separación que se puede apreciar entre los distintos sonidos de una composición musical. Los valores recomendados dependen del tipo de música, aceptándose comúnmente valores comprendidos entre -4 y 4 dB, aunque se recomiendan márgenes más estrictos, entre -2 y 2 dB (Barba, 2016).

Se han comparado los valores obtenidos con los de 16 iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para la claridad musical es de un máximo de -5,2 dB y un mínimo de -9,9 dB, siendo el valor medio igual a -7,27 dB. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro C80 en la Basílica para el Misteri se encuentra en la media de este tipo de espacios.

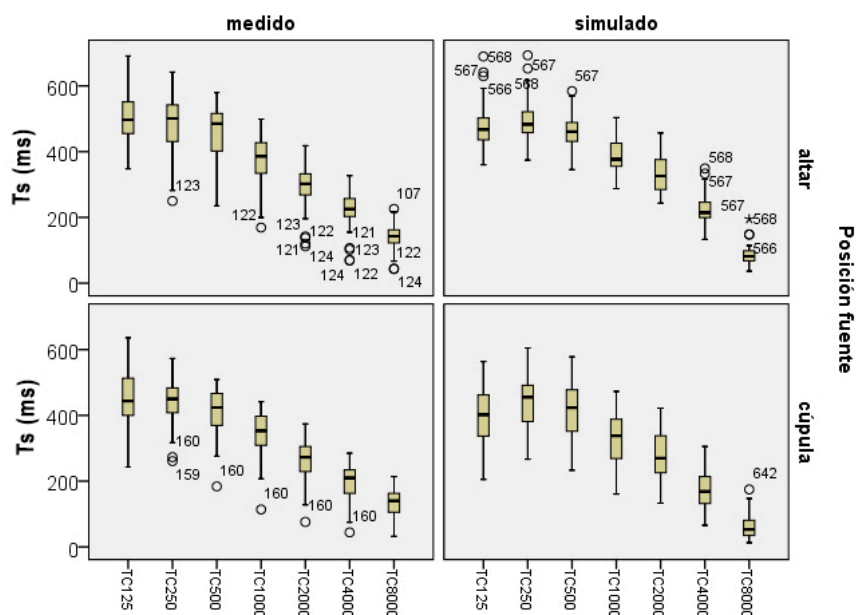


Figura IV.2.2.22. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro Ts por frecuencias.

La figura IV.2.2.22 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro Ts. Los valores muestran un grado de dispersión similar a los parámetros de energía ya estudiados. Existen algunos puntos espurios, pero son casos aislados y que no difieren excesivamente de la tendencia generalizada.

La figura IV.2.2.23 muestra los valores de Ts promedio de las por frecuencias, medidos en la Basílica preparada para la representación del Misteri, y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. En este caso, aunque la tendencia es similar para los cuatro casos representados, se observan algunas diferencias, sobre todo a frecuencias bajas, entre los resultados obtenidos con una fuente y con otra, y entre valores medidos y simulados cuando la fuente es tá en el altar. A medida que aumenta la frecuencia los resultados de los cuatro casos homogeneizan su comportamiento.

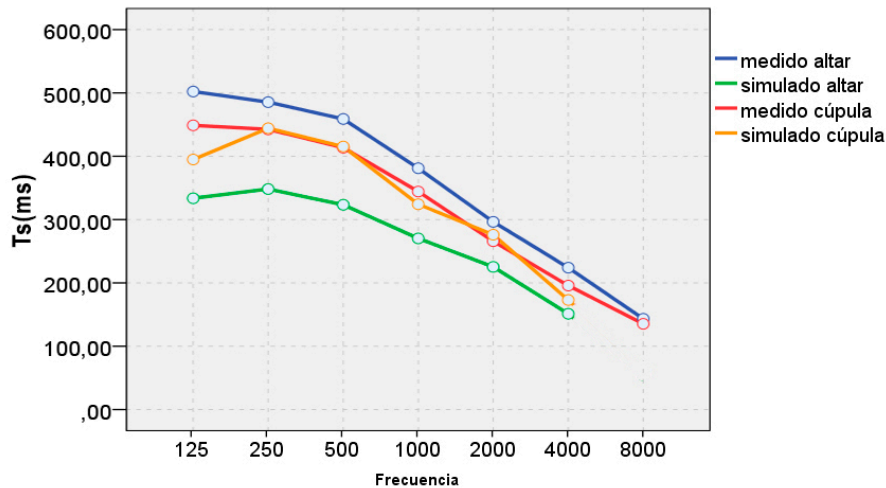


Figura IV.2.2.23. Valores de Ts promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La tendencia es similar a la de los parámetros RT y EDT produciéndose una caída en los valores de Ts a medida que aumenta la frecuencia.

En las figuras IV.2.2.24 y IV.2.2.25 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de las capillas son superiores al resto, la nave, balcones y tribuna presentan valores intermedios, mientras que los más bajos se encuentran en el transepto cuando la fuente está en la cúpula y en el ábside cuando está en el altar.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo en los balcones, capillas y tribuna pero varía de manera considerable en las otras tres zonas.

En cuanto a la calibración, cabe destacar que se observan más diferencias en las simulaciones realizadas con la fuente en el altar para la zona de la nave a frecuencias bajas y medias

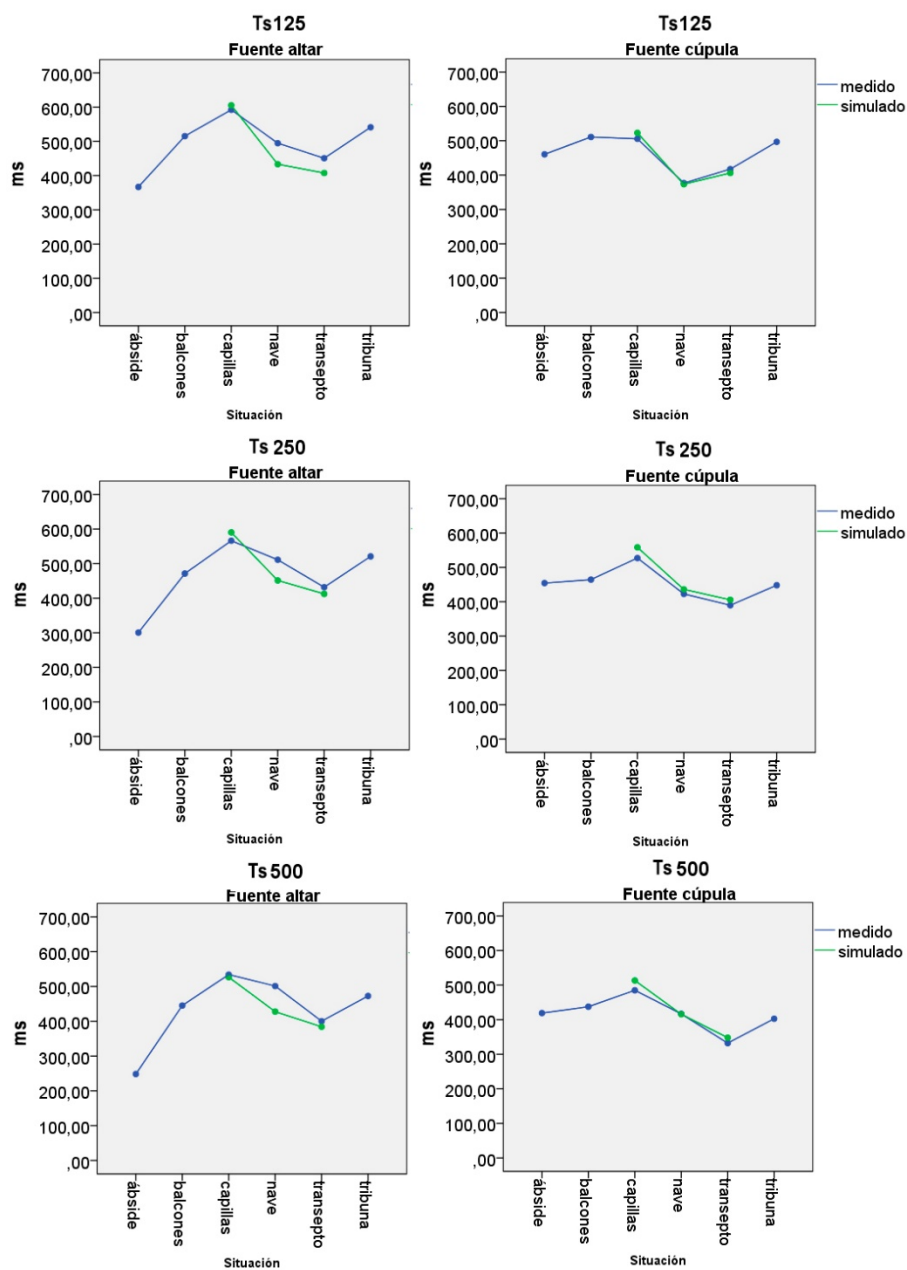


Figura IV.2.2.24. Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

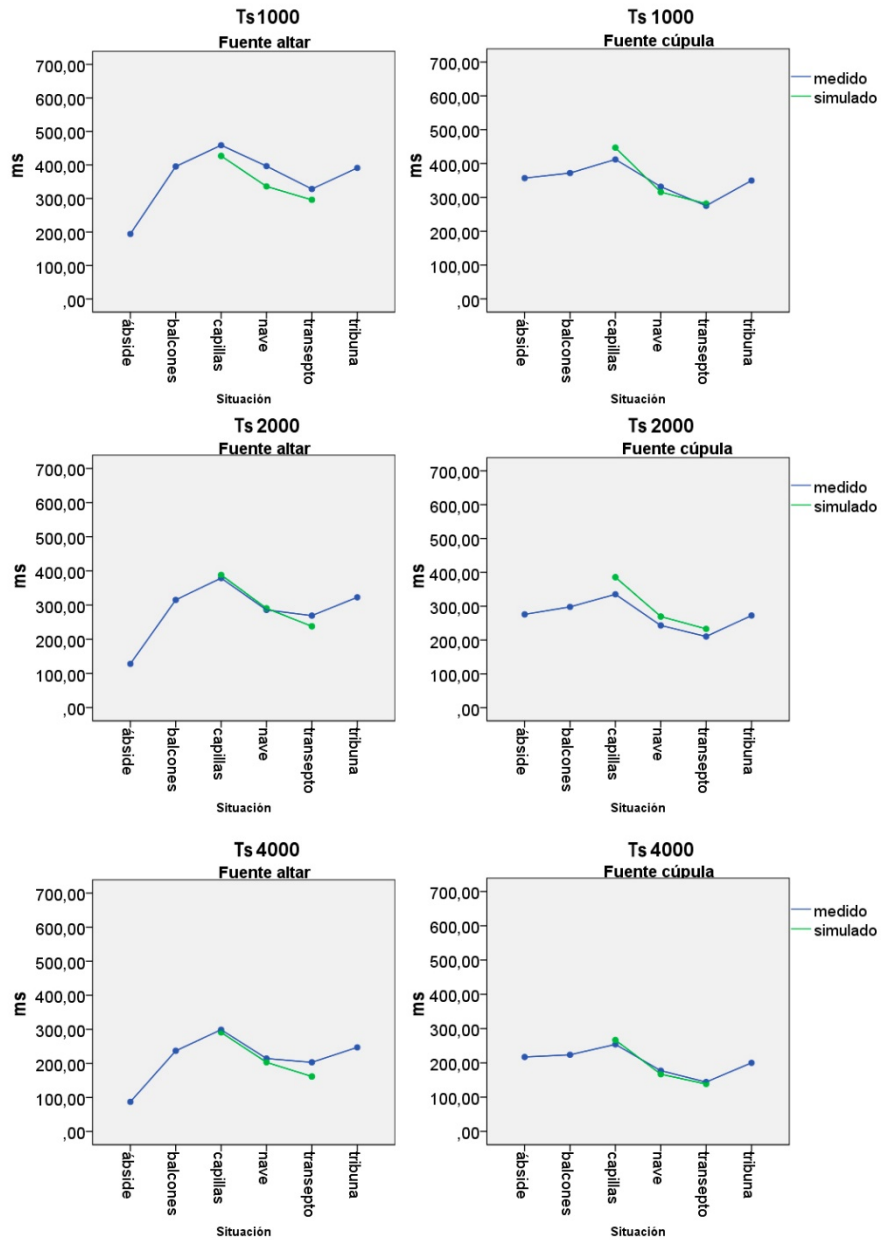


Figura IV.2.25. Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.11. Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med sim		med sim								
			medido	sim	medido	sim							
Ts125	ábside	altar	366,750			44,808	-93,750	0,140	3,01				
		cúpula	460,500			44,808							
	balcones	altar	515,190			19,556	4,238	0,878	0,10				
		cúpula	510,952			19,556							
	capillas	altar	592,143	1,800	33,871	44,808	86,571	<0,001	1,72	590,343	<0,001	1,17	
		cúpula	505,571	522,880	33,871	44,808				-17,309	0,758	0,04	
	nave	altar	494,593	356,848	17,246	17,246	117,889	0,004	2,80	137,744	<0,001	0,33	
		cúpula	376,704	373,326	17,246	17,246				3,378	0,890	0,01	
	transepto	altar	450,667	450,757	25,870	36,585	33,250	0,221	0,87	-0,090	0,998	0,00	
		cúpula	417,417	406,163	25,870	36,585				11,253	0,802	0,03	
	tribuna	altar	541,083			25,870	44,333	0,227	0,96				
		cúpula	496,750			25,870							
Ts250	ábside	altar	300,500			44,931	-153,750	0,016	6,02				
		cúpula	454,250			44,931							
	balcones	altar	471,238			19,609	6,857	0,805	0,17				
		cúpula	464,381			19,609							
	capillas	altar	566,143	2,173	33,964	44,931	39,000	<0,001	0,81	563,970	<0,001	1,17	
		cúpula	527,143	558,425	33,964	44,931				-31,282	0,579	0,07	
	nave	altar	511,148	375,780	17,294	17,294	88,519	0,412	2,04	135,368	<0,001	0,31	
		cúpula	422,630	435,863	17,294	17,294				-13,233	0,589	0,04	
	transepto	altar	431,833	454,550	25,941	36,686	42,167	0,153	1,15	-22,717	0,614	0,06	
		cúpula	389,667	405,583	25,941	36,686				-15,917	0,723	0,05	
	tribuna	altar	520,833			25,941	72,833	0,048	1,65				
		cúpula	448,000			25,941							
Ts500	ábside	altar	248,250			42,055	-170,750	0,004	8,09				
		cúpula	419,000			42,055							
	balcones	altar	445,190			18,354	7,714	0,767	0,20				
		cúpula	437,476			18,354							
	capillas	altar	534,143	2,205	31,791	42,055	49,286	<0,001	1,09	531,938	<0,001	1,17	
		cúpula	484,857	513,335	31,791	42,055				-28,478	0,590	0,07	
	nave	altar	501,222	351,067	16,187	16,187	84,481	0,543	1,98	150,156	<0,001	0,35	
		cúpula	416,741	415,814	16,187	16,187				0,927	0,868	0,00	
	transepto	altar	400,250	413,077	24,280	34,338	68,083	0,026	2,00	-12,827	0,761	0,04	
		cúpula	332,167	347,900	24,280	34,338				-15,733	0,709	0,06	
	tribuna	altar	472,667			24,280	70,000	0,043	1,74				
		cúpula	402,667			24,280							
Ts1000	ábside	altar	194,250			37,873	-162,750	0,003	9,86				
		cúpula	357,000			37,873							
	balcones	altar	395,381			16,529	23,381	0,318	0,70				
		cúpula	372,000			16,529							
	capillas	altar	458,857	1,952	28,629	37,873	46,857	<0,001	1,20	456,905	<0,001	1,17	
		cúpula	412,000	446,925	28,629	37,873				-34,925	0,463	0,10	
	nave	altar	396,407	296,134	14,577	14,577	64,852	0,121	1,92	100,274	<0,001	0,30	
		cúpula	331,556	315,600	14,577	14,577				15,956	0,440	0,06	
	transepto	altar	328,250	333,158	21,866	30,923	53,083	0,052	1,90	-4,908	0,697	0,02	
		cúpula	275,167	281,413	21,866	30,923				-6,247	0,868	0,03	
	tribuna	altar	391,083			21,866	41,333	0,183	1,24				
		cúpula	349,750			21,866							

Tabla IV.2.2.12. Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			med	sim	med	sim							
			medido	sim	medido	sim							
Ts2000	ábside	altar	128,000		32,543		-147,750	0,002	13,58				
		cúpula	275,750		32,543								
	balcones	altar	315,238		14,203		17,333	0,389	0,65				
		cúpula	297,905		14,203								
	capillas	altar	379,000	1,618	24,601	32,543	43,857	<0,001	1,36	377,383	<0,001	1,17	
		cúpula	335,143	385,668	24,601	32,543				-50,525	0,217	0,18	
	nave	altar	285,741	247,297	12,526	12,526	42,741	0,412	1,76	38,444	0,031	0,16	
		cúpula	243,000	269,440	12,526	12,526				-26,440	0,137	0,13	
	transepto	altar	269,167	275,502	18,789	26,572	58,667	0,029	2,56	-6,335	0,846	0,03	
		cúpula	210,500	232,897	18,789	26,572				-22,397	0,492	0,13	
	tribuna	altar	322,833		18,789		50,417	0,059	1,84				
		cúpula	272,417		18,789								
	Ts4000	ábside	altar	87,000		23,941		-130,000	<0,001	17,58			
			cúpula	217,000		23,941							
balcones		altar	236,905		10,449		13,476	0,363	0,67				
		cúpula	223,429		10,449								
capillas		altar	298,857	1,007	18,098	23,941	44,857	<0,001	1,77	297,850	<0,001	1,17	
		cúpula	254,000	266,620	18,098	23,941				-12,620	0,675	0,06	
nave		altar	214,222	168,107	9,215	9,215	37,037	0,039	2,03	46,116	<0,001	0,25	
		cúpula	177,185	166,893	9,215	9,215				10,292	0,430	0,07	
transepto		altar	203,167	175,488	13,822	19,548	59,083	0,005	3,42	27,678	0,249	0,16	
		cúpula	144,083	138,473	13,822	19,548				5,610	0,815	0,05	
tribuna		altar	247,000		13,822		46,917	0,017	2,23				
		cúpula	200,083		13,822								
Ts8000		ábside	altar	55,750		13,975		-101,500	<0,001	21,42			
			cúpula	157,250		13,975							
	balcones	altar	156,095		6,099		-9,000	0,298	0,68				
		cúpula	165,095		6,099								
	capillas	altar	201,286		10,564		13,571	<0,001	0,79				
		cúpula	187,714		10,564								
	nave	altar	135,741		5,379		24,444	0,003	2,12				
		cúpula	111,296		5,379								
	transepto	altar	132,500		8,069		29,000	0,410	2,57				
		cúpula	103,500		8,069								
	tribuna	altar	144,000		8,069		12,000	0,294	0,98				
		cúpula	132,000		8,069								

La tabla IV.2.2.11 muestra la comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran siempre en el ábside. Los balcones experimentan las menores variaciones. La nave tiene un comportamiento intermedio, con diferencias que se reducen conforme aumenta la frecuencia.

Existe diferencia estadísticamente significativa a todas las frecuencias en las capillas, y en casos aislados en la nave y el ábside.

A nivel de percepción, se supera 1 JND de diferencia entre una fuente y otra en todos los casos excepto en los balcones, y el transepto y tribuna a 125 Hz.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son elevadas en las capillas para la fuente en el altar y muy pequeñas en el transepto. Existe diferencia estadísticamente significativa en las capillas y la nave para la fuente en el altar.

No obstante, al trasladar los resultados a términos de percepción los resultados son buenos ya que no se superan los 2 JND de diferencia en ningún caso, por lo que se puede considerar que la simulación es buena en lo referente al parámetro T_s para todas las zonas y frecuencias.

La tabla IV.2.2.12 muestra la comparación de los valores medios de T_s medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares, con las principales diferencias debidas a la posición de la fuente en el ábside, y superando 1 JND en todas las zonas excepto los balcones.

En este rango de frecuencias la simulación es también válida sin superar los 2 JND en ningún caso.

Se han comparado los valores obtenidos con los de cinco iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% de volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Carvalho, 1994; Carvalho, 2009; Magrini y Ricciardi, 2002). El rango de valores para el tiempo central es de un máximo de 368,9 ms y un mínimo de 277,8 ms, siendo el valor medio igual a 332,34 ms. Un tiempo central corto va asociado a una mayor claridad mientras que si es largo supone una nitidez menor y mayor reverberación. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro T_s en la Basílica para el Misteri tiene valores dentro de los habituales en este tipo de espacios.

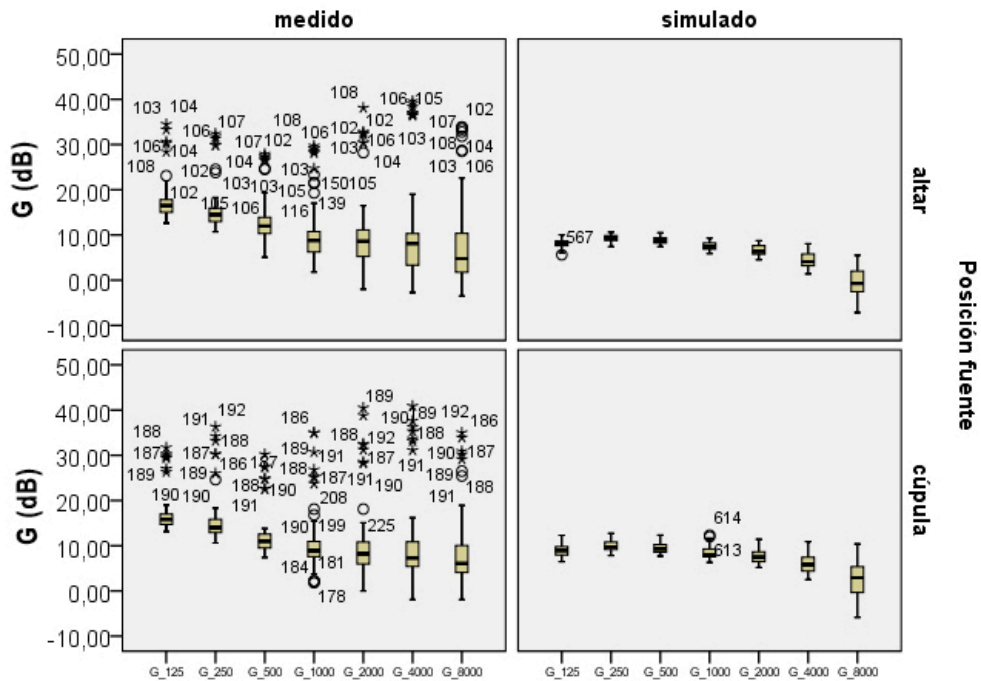


Figura IV.2.2.26. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro G por frecuencias.

La figura IV.2.2.26 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro G. El diagrama de cajas muestra que existen numerosos puntos espurios y una variabilidad en las medidas que aumenta con la frecuencia y que no se refleja en las simulaciones.

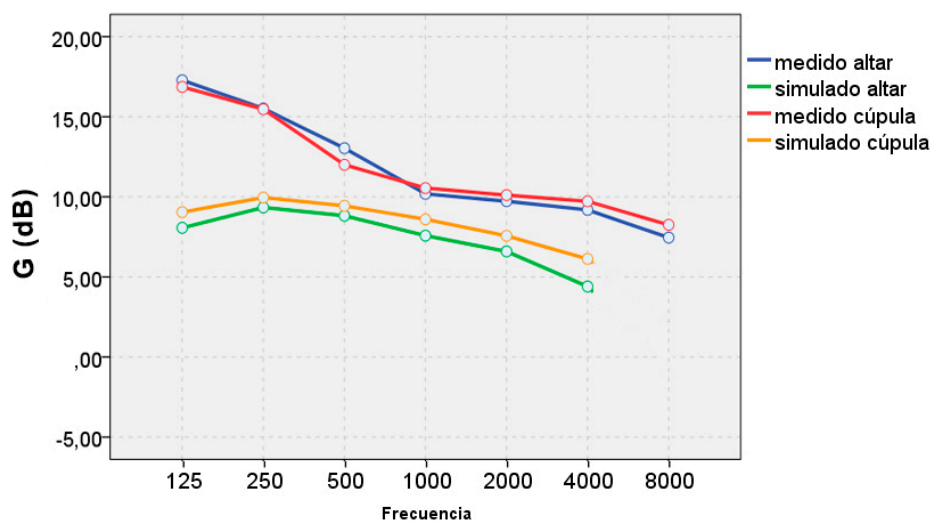


Figura IV.2.2.27. Valores de G promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.2.27 muestra los valores de G promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa un distanciamiento del orden de unos 2 dB a frecuencias medias entre los valores medidos y simulados, aumentando a bajas y altas. Las dos líneas correspondientes a las medidas son prácticamente coincidentes y lo mismo ocurre con las dos que representan las simulaciones.

En las figuras IV.2.2.28 y IV.2.2.29 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de las capillas son muy superiores al resto, mientras que el comportamiento en el resto de zonas es más similar. Esto sucede para todas las frecuencias en las dos posiciones de fuente.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo para las dos posiciones estudiadas.

En cuanto a la calibración, los resultados son malos en general, destacando especialmente la zona de las capillas, en las que se obtienen los valores mínimos en la simulación mientras que, como ya se ha comentado, los medidos son muy superiores al resto.

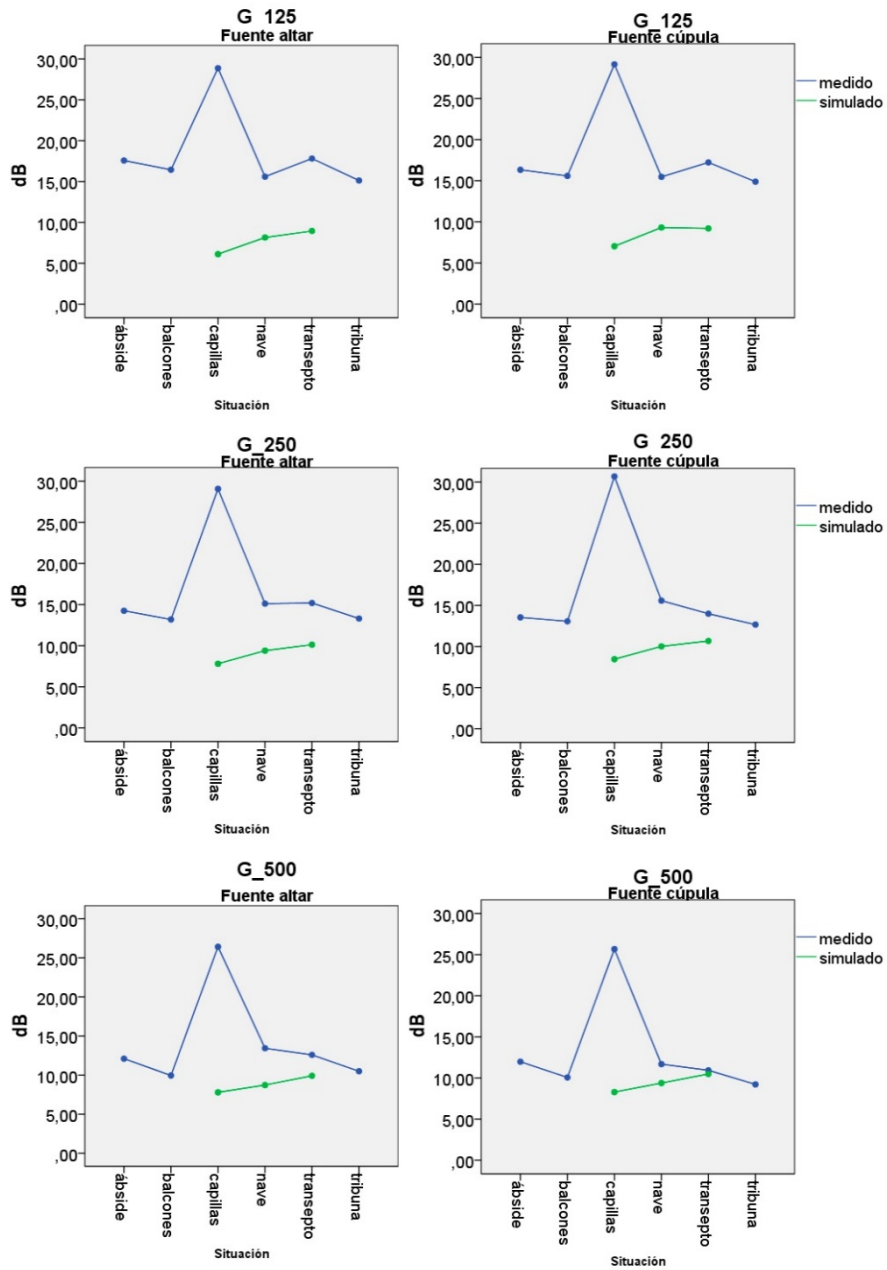


Figura IV.2.2.28. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

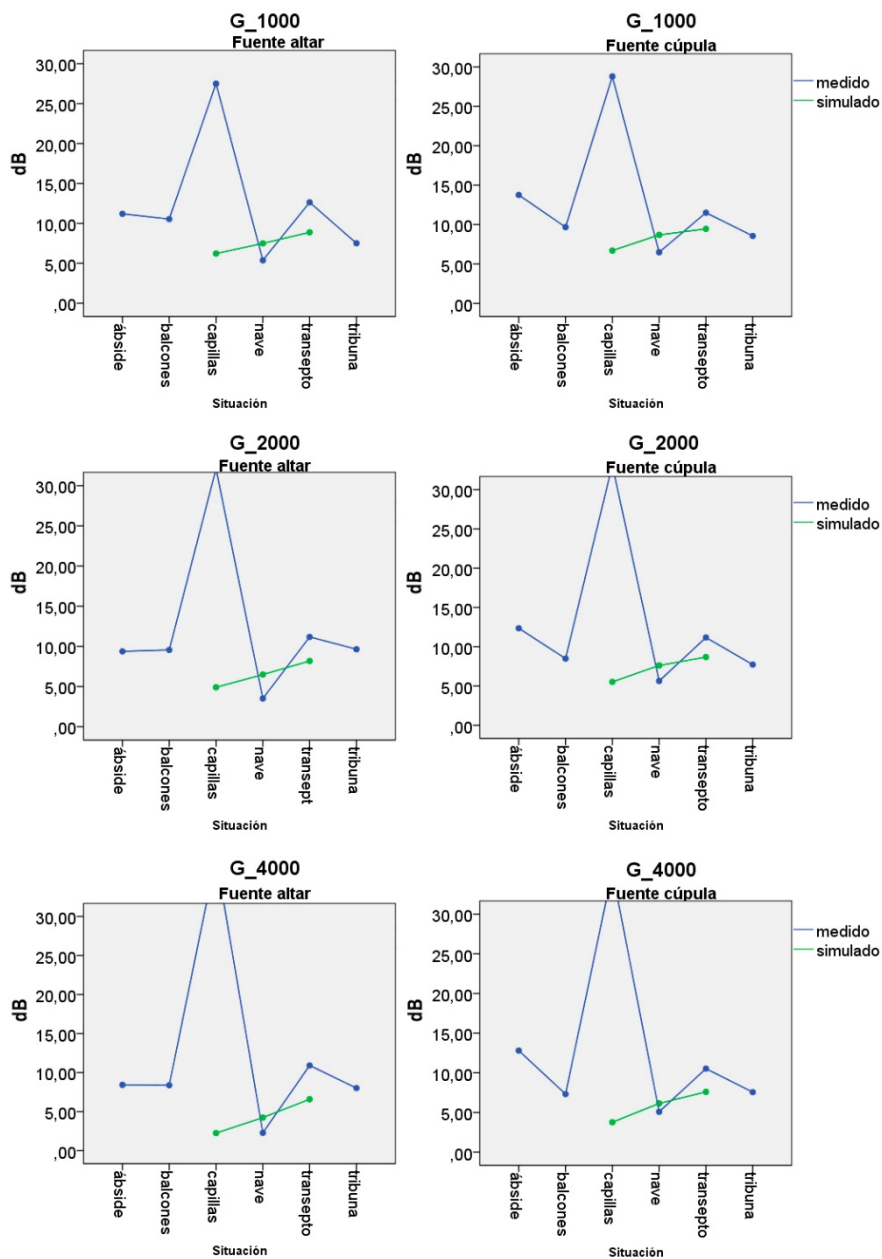


Figura IV.2.2.29. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

Tabla IV.2.2.13. Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	P	JND fuente	Dif. sim.	P	JND sim.	
			medido	sim	medido	sim							
G_125	ábside	altar	17,575		0,728		1,250	0,226	1,25				
		cúpula	16,325		0,728								
	balcones	altar	16,443		0,318		0,862	0,056	0,86				
		cúpula	15,581		0,318								
	capillas	altar	28,871	6,118	0,550	0,728	-0,286	0,354	0,29	22,754	<0,001	22,75	
		cúpula	29,157	7,030	0,550	0,728				22,127	<0,001	22,13	
	nave	altar	15,596	8,153	0,280	0,280	0,130	0,069	0,13	7,444	<0,001	7,44	
		cúpula	15,467	9,308	0,280	0,280				6,159	<0,001	6,16	
	transepto	altar	17,817	8,950	0,420	0,594	0,592	0,737	0,59	8,867	<0,001	8,87	
		cúpula	17,225	9,195	0,420	0,594				8,030	<0,001	8,03	
	tribuna	altar	15,125		0,420		0,242	0,685	0,24				
		cúpula	14,883		0,420								
	G_250	ábside	altar	14,250		0,757		0,700	0,514	0,70			
			cúpula	13,550		0,757							
balcones		altar	13,190		0,330		0,124	0,791	0,12				
		cúpula	13,067		0,330								
capillas		altar	29,071	7,805	0,572	0,757	-1,614	0,093	1,61	21,266	<0,001	21,27	
		cúpula	30,686	8,455	0,572	0,757				22,231	<0,001	22,23	
nave		altar	15,119	9,393	0,291	0,291	-0,463	0,063	0,46	5,726	<0,001	5,73	
		cúpula	15,581	10,017	0,291	0,291				5,564	<0,001	5,56	
transepto		altar	15,192	10,122	0,437	0,618	1,200	0,548	1,20	5,070	<0,001	5,07	
		cúpula	13,992	10,678	0,437	0,618				3,313	<0,001	3,31	
tribuna		altar	13,300		0,437		0,633	0,306	0,63				
		cúpula	12,667		0,437								
G_500		ábside	altar	12,100		0,744		0,125	0,906	0,13			
			cúpula	11,975		0,744							
	balcones	altar	9,952		0,325		-0,114	0,804	0,11				
		cúpula	10,067		0,325								
	capillas	altar	26,414	7,795	0,563	0,744	0,743	0,847	0,74	18,619	<0,001	18,62	
		cúpula	25,671	8,283	0,563	0,744				17,389	<0,001	17,39	
	nave	altar	13,437	8,729	0,286	0,286	1,756	0,055	1,76	4,709	<0,001	4,71	
		cúpula	11,681	9,380	0,286	0,286				2,301	<0,001	2,30	
	transepto	altar	12,592	9,917	0,430	0,608	1,658	0,302	1,66	2,675	<0,001	2,68	
		cúpula	10,933	10,487	0,430	0,608				0,447	0,549	0,45	
	tribuna	altar	10,492		0,430		1,275	0,037	1,27				
		cúpula	9,217		0,430								
	G_1000	ábside	altar	11,200		1,140		-2,550	0,115	2,55			
			cúpula	13,750		1,140							
balcones		altar	10,538		0,497		0,867	0,219	0,87				
		cúpula	9,671		0,497								
capillas		altar	27,500	6,215	0,861	1,140	-1,286	0,384	1,29	21,285	<0,001	21,29	
		cúpula	28,786	6,692	0,861	1,140				22,093	<0,001	22,09	
nave		altar	5,374	7,488	0,439	0,439	-1,111	0,009	1,11	-2,114	0,001	2,11	
		cúpula	6,485	8,688	0,439	0,439				-2,203	<0,001	2,20	
transepto		altar	12,633	8,878	0,658	0,931	1,133	0,729	1,13	3,755	0,001	3,75	
		cúpula	11,500	9,452	0,658	0,931				2,048	0,074	2,05	
tribuna		altar	7,508		0,658		-1,042	0,264	1,04				
		cúpula	8,550		0,658								

Tabla IV.2.2.14. Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
			medido	sim	medido	sim						
G_2000	ábside	altar	9,375		1,296		-2,975	0,106	2,98			
		cúpula	12,350		1,296							
	balcones	altar	9,552		0,566		1,062	0,186	1,06			
		cúpula	8,490		0,566							
	capillas	altar	32,086	4,907	0,980	1,296	-1,057	0,465	1,06	27,178	<0,001	27,18
		cúpula	33,143	5,530	0,980	1,296				27,613	<0,001	27,61
	nave	altar	3,511	6,491	0,499	0,499	-2,133	0,001	2,13	-2,980	<0,001	2,98
		cúpula	5,644	7,617	0,499	0,499				-1,972	0,006	1,97
	transepto	altar	11,175	8,180	0,748	1,058	0,000	0,781	0,00	2,995	0,022	2,99
		cúpula	11,175	8,690	0,748	1,058				2,485	0,058	2,48
	tribuna	altar	9,642		0,748		1,917	0,071	1,92			
		cúpula	7,725		0,748							
G_4000	ábside	altar	8,425		1,417		-4,375	0,030	4,38			
		cúpula	12,800		1,417							
	balcones	altar	8,381		0,618		1,067	0,224	1,07			
		cúpula	7,314		0,618							
	capillas	altar	37,657	2,252	1,071	1,417	2,257	0,768	2,26	35,405	<0,001	35,40
		cúpula	35,400	3,768	1,071	1,417				31,633	<0,001	31,63
	nave	altar	2,281	4,236	0,545	0,545	-2,804	<0,001	2,80	-1,954	0,012	1,95
		cúpula	5,085	6,143	0,545	0,545				-1,058	0,172	1,06
	transepto	altar	10,917	6,588	0,818	1,157	0,392	0,759	0,39	4,328	0,003	4,33
		cúpula	10,525	7,595	0,818	1,157				2,930	0,040	2,93
	tribuna	altar	8,017		0,818		0,458	0,692	0,46			
		cúpula	7,558		0,818							
G_8000	ábside	altar	8,850		1,641		-2,075	0,372	2,08			
		cúpula	10,925		1,641							
	balcones	altar	7,767		0,716		0,638	0,529	0,64			
		cúpula	7,129		0,716							
	capillas	altar	31,843		1,240		1,700	0,958	1,70			
		cúpula	30,143		1,240							
	nave	altar	0,889		0,632		-2,233	<0,001	2,23			
		cúpula	3,122		0,632							
	transepto	altar	11,275		0,947		0,825	0,642	0,82			
		cúpula	10,450		0,947							
	tribuna	altar	3,167		0,947		-2,717	0,044	2,72			
		cúpula	5,883		0,947							

La tabla IV.2.2.13 muestra la comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en el ábside a todas las frecuencias, alcanzando el valor máximo de 2,5 dB a 1000 Hz. Las menores diferencias se encuentran en los balcones, con valores máximos de 0,8 dB. En el resto de zonas se encuentran entre 1-2 dB.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en la zona de la nave a 1000 Hz.

A nivel de percepción la fuente influye en todas las zonas, excepto los balcones a frecuencias medias, superando 1 JND de diferencia.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son considerables en todos los casos, llegando a 22 dB de diferencia en las capillas y consiguiendo valores simulados similares a los medidos únicamente en el transepto a frecuencias medias.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos excepto en el transepto a frecuencias medias.

En términos de percepción se observan también grandes diferencias, superando con creces los 2 JND en todas las zonas a frecuencias bajas, y en las capillas y nave a medias y altas, alcanzando valores de 22 dB.

La tabla IV.2.2.14 muestra la comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares, con las principales diferencias debidas a la posición de la fuente en el ábside. A frecuencias altas se supera 1 JND de diferencia también en los balcones y es en el transepto donde no hay diferencias. Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos menos dos. En términos de percepción, la simulación es mala también a frecuencias altas, superando los 2 JND en todas las zonas excepto la nave a 4000 Hz y alcanzando los 35 JND en las capillas.

En el 89% de los casos las diferencias entre valores medidos y simulados para el parámetro G superan los 2 JND.

Se han comparado los valores obtenidos con los de 12 iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006; Carvalho, 1994; Carvalho, 2009). El rango de valores para la fuerza sonora es de un máximo de 9,4 dB y un mínimo de 5,8 dB, siendo el valor medio igual a 7,67 dB. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro G en la Basílica para el Misteri tiene valores elevados, muy por encima de los habituales en este tipo de espacios. Un valor alto del parámetro G indica que la sala amplifica el sonido, reforzándolo mediante sus reflexiones.

IV.2.2.4.3. Parámetros de inteligibilidad

La inteligibilidad es un parámetro esencial para la audición de la palabra y cuantifica la comprensión verbal. La inteligibilidad de la sala se ha descrito mediante el parámetro STI.

La figura IV.2.2.30 muestra el diagrama de cajas para el parámetro STI. Se observa que la variabilidad es baja, encontrándose la mayoría de los puntos entre 0,25 y 0,35 para la fuente en el altar y entre 0,3 y 0,4 para la fuente bajo la cúpula. Los valores simulados son superiores a los reales en los dos casos, alejándose de manera considerable para la fuente en el altar.

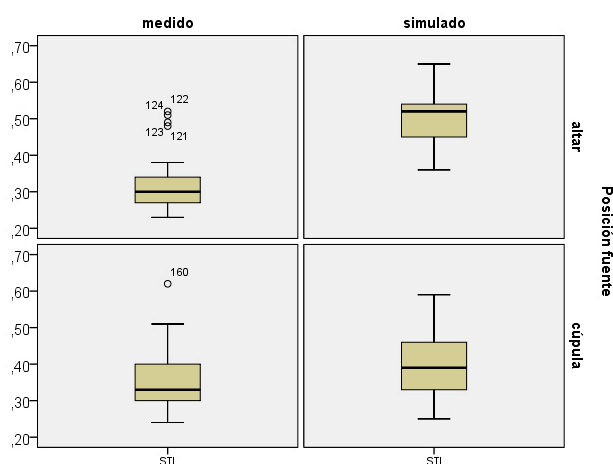


Figura IV.2.2.30. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro STI

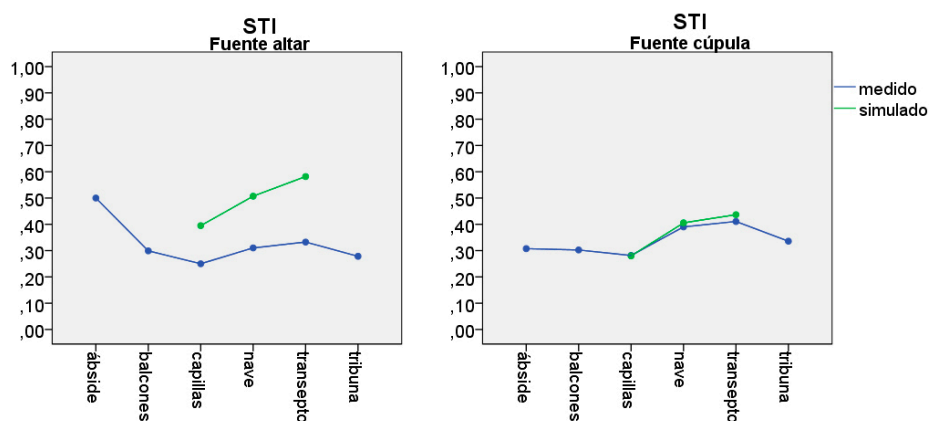


Figura IV.2.2.31. Valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

La figura IV.2.2.31 muestra gráficamente los resultados obtenidos para cada zona y posición de fuente. Se observa que los valores son muy similares en todas las zonas, obteniendo resultados algo mejores en la nave y el transepto. La simulación con la fuente en el altar se aleja de los valores medidos para las tres zonas simuladas.

Tabla IV.2.2.15. Comparación de los valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.

Situación	Fuente	Media		Error estándar		p	Dif. fuente	p	Dif. med-sim
		medido	simulado	medido	simulado				
ábside	altar	0,500		0,026		<0,001	0,193		
	cúpula	0,308		0,026					
balcones	altar	0,299		0,011		0,837	-0,003		
	cúpula	0,302		0,011					
capillas	altar	0,250	0,395	0,020	0,026	0,263	-0,031	<0,001	-0,145
	cúpula	0,281	0,280	0,020	0,026			0,965	0,001
nave	altar	0,310	0,507	0,010	0,010	<0,001	-0,080	<0,001	-0,197
	cúpula	0,390	0,406	0,010	0,010			0,288	-0,015
transepto	altar	0,333	0,582	0,015	0,021	<0,001	-0,078	<0,001	-0,249
	cúpula	0,411	0,437	0,015	0,021			0,325	-0,026
tribunas	altar	0,278		0,015		0,080	-0,058		
	cúpula	0,336		0,015					

La tabla IV.2.2.15 recoge los valores medios medidos y simulados por zonas para el parámetro STI. Las diferencias entre una fuente y otra son mínimas salvo en la zona de l ábside, probablemente debido a la proximidad de los receptores con la fuente situada en el altar. Existe diferencia estadísticamente significativa en las zonas del ábside, la nave y el transepto.

En cuanto a la simulación, la realizada con la fuente en la cúpula ha aportado mejores resultados, ajustándose casi completamente. La simulación con la fuente en el altar ha aportado malos resultados y existe diferencia estadísticamente significativa en este caso.

El parámetro STI califica el grado de inteligibilidad de sala mediante un valor comprendido entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Los valores obtenidos en la Basílica se sitúan en torno a 0,26 en las capillas, 0,3 en la nave y 0,4 en el transepto. Atendiendo a la escala de correspondencia entre el grado de inteligibilidad y el valor de STI, que se recoge en el capítulo II.3, se puede afirmar que la inteligibilidad es mala en las capillas, los balcones y las tribunas, y pobre en el ábside, el transepto y la nave.

IV.2.2.4.4. Parámetros de espacialidad

La sensación espacial se cuantifica a través de la percepción del entorno por el sonido, dando la impresión de encontrarse en un espacio pequeño y estar cerca de la fuente sonora. Esta cualidad se potencia con la llegada adecuada de reflexiones laterales. En este caso se han empleado el parámetro binaural IACCA y el índice de fracción lateral LF.

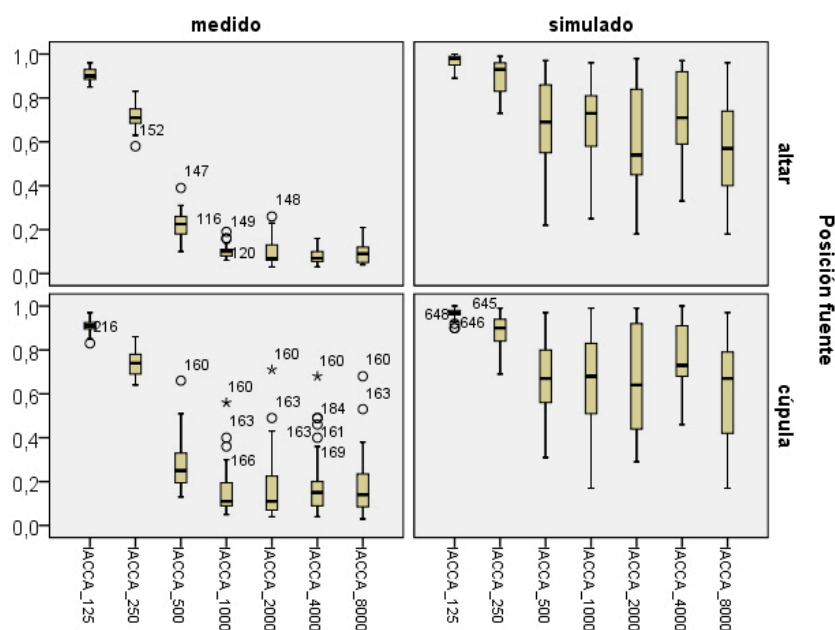


Figura IV.2.2.32. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro IACCA por frecuencias.

La figura IV.2.2.32 recoge los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias del parámetro IACCA. Cabe destacar la gran variabilidad en los resultados de las medidas, aunque aparecen varios puntos espurios cuando la fuente se sitúa bajo la cúpula.

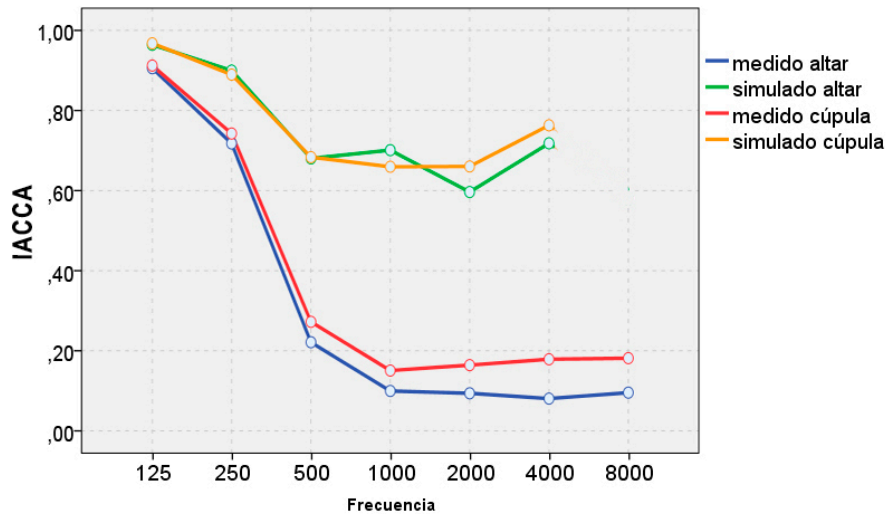


Figura IV.2.2.33. Valores de IACCA promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

La figura IV.2.2.33 muestra los valores de IACCA promedio de sala por frecuencias, medidos en la Basílica configurada para el Misteri y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa de nuevo el distanciamiento entre los valores medidos y simulados. Las dos líneas correspondientes a las medidas son prácticamente paralelas entre sí y lo mismo ocurre con las dos que representan las simulaciones. Los valores simulados son muy superiores a los medidos a frecuencias medias y altas.

En las figuras IV.2.2.34 y IV.2.2.35 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento es bastante homogéneo. Los valores en la zona de la nave son ligeramente superiores a las otras zonas, siendo más evidente este comportamiento a frecuencias altas.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo para las dos posiciones en todas las zonas.

En cuanto a la calibración, los resultados son malos en general, para todas las zonas. Únicamente se aproximan a 125 Hz. Para el resto de frecuencias los valores simulados son muy superiores a los medidos en todas las zonas.

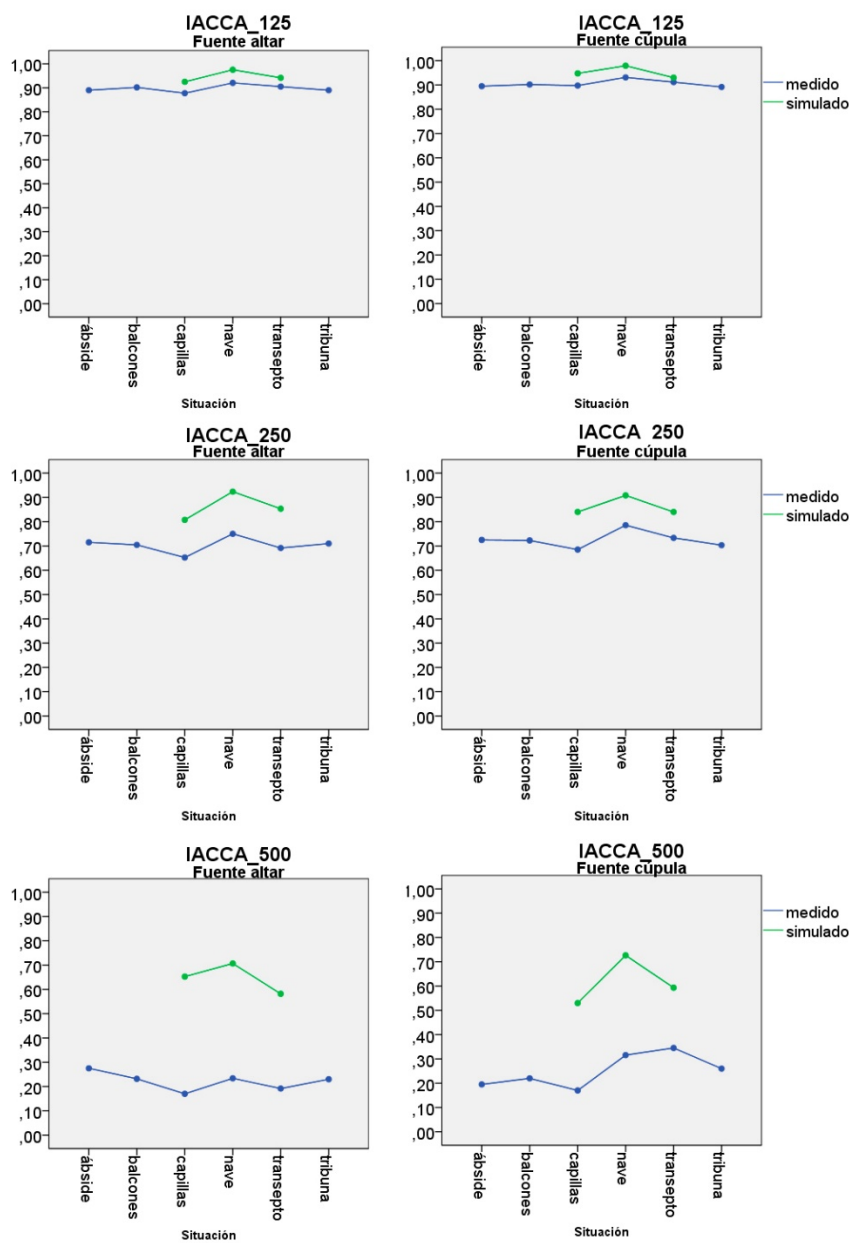


Figura IV.2.2.34. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias de fuente, altar y cúpula.

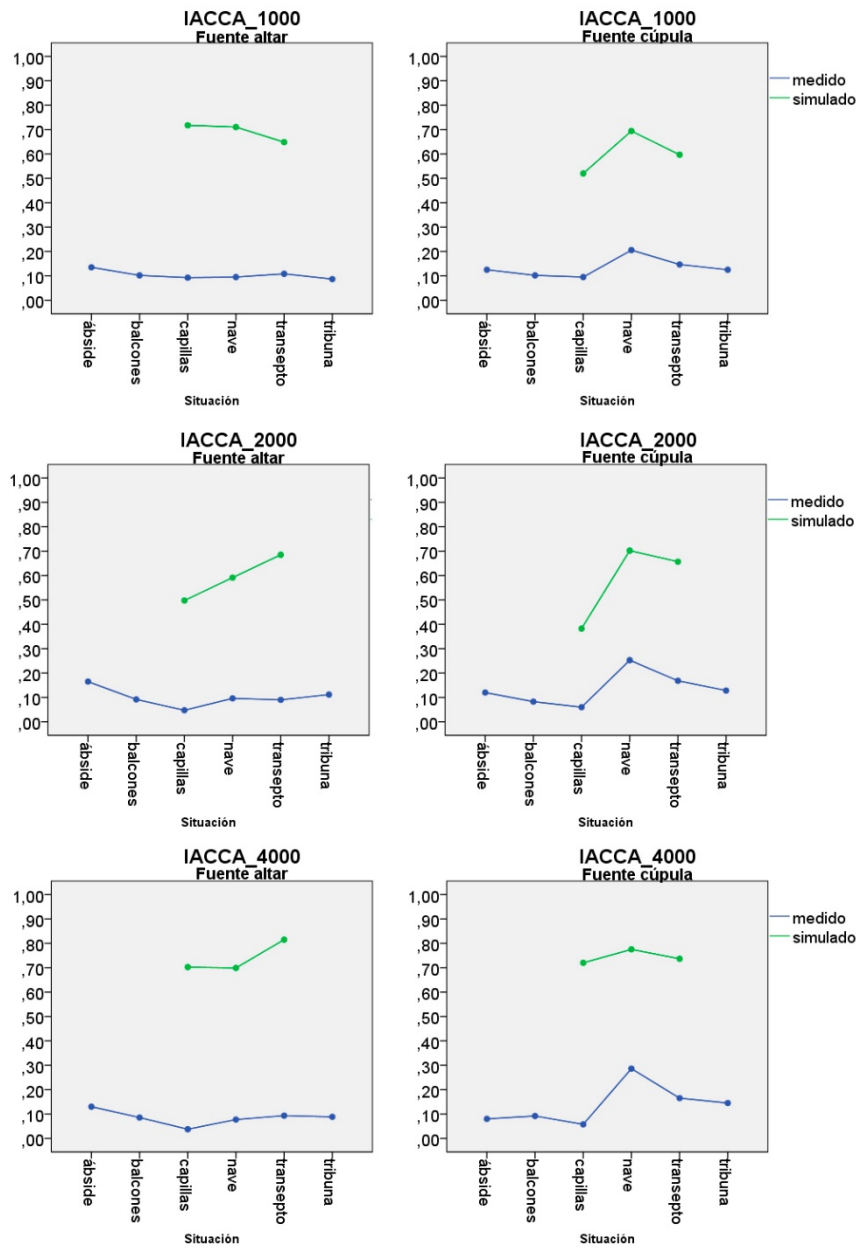


Figura IV.2.2.35. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.16. Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.		
			med_sim		med_sim									
			medido	sim	medido	sim								
IACCA_1 25	ábside	altar	0,890		0,017		-0,005	0,854	0,06					
		cúpula	0,895		0,017									
	balcones	altar	0,902		0,007		0,000	1,000	0,00					
		cúpula	0,902		0,007									
	capillas	altar	0,878	0,925	0,012	0,012	-0,020	0,300	0,25	-0,047	0,006	0,59	0,62	
		cúpula	0,898	0,947	0,012	0,012								
	nave	altar	0,921	0,975	0,006	0,005	-0,011	0,246	0,13	-0,055	<0,001	0,68	0,60	
		cúpula	0,931	0,979	0,006	0,005								
	transepto	altar	0,905	0,942	0,010	0,010	-0,007	0,671	0,08	-0,037	0,009	0,46	0,23	
		cúpula	0,912	0,930	0,010	0,010								
	tribuna	altar	0,890		0,010		-0,002	0,915	0,02					
		cúpula	0,892		0,010									
	IACCA_2 50	ábside	altar	0,715		0,042		-0,010	0,838	0,13				
			cúpula	0,725		0,042								
balcones		altar	0,705		0,018		-0,018	0,383	0,23					
		cúpula	0,723		0,018									
capillas		altar	0,653	0,808	0,029	0,029	-0,033	0,347	0,41	-0,155	<0,001	1,94	1,94	
		cúpula	0,685	0,840	0,029	0,029								
nave		altar	0,750	0,924	0,014	0,011	-0,036	0,031	0,44	-0,174	<0,001	2,17	1,53	
		cúpula	0,786	0,908	0,014	0,011								
transepto		altar	0,692	0,853	0,024	0,024	-0,042	0,141	0,52	-0,162	<0,001	2,02	1,33	
		cúpula	0,733	0,840	0,024	0,024								
tribuna		altar	0,710		0,024		0,007	0,813	0,08					
		cúpula	0,703		0,024									
IACCA_5 00		ábside	altar	0,275		0,094		0,080	0,302	1,00				
			cúpula	0,195		0,094								
	balcones	altar	0,232		0,040		0,012	0,720	0,15					
		cúpula	0,220		0,040									
	capillas	altar	0,170	0,653	0,066	0,066	0,000	1,000	0,00	-0,483	<0,001	6,03	4,50	
		cúpula	0,170	0,530	0,066	0,066								
	nave	altar	0,234	0,707	0,031	0,026	-0,082	0,002	1,02	-0,473	<0,001	5,91	5,13	
		cúpula	0,316	0,726	0,031	0,026								
	transepto	altar	0,192	0,582	0,054	0,054	-0,153	0,001	1,92	-0,390	<0,001	4,87	3,10	
		cúpula	0,345	0,593	0,054	0,054								
	tribuna	altar	0,230		0,054		-0,030	0,502	0,37					
		cúpula	0,260		0,054									
	IACCA_ 1000	ábside	altar	0,135		0,098		0,010	0,885	0,13				
			cúpula	0,125		0,098								
balcones		altar	0,102		0,042		0,000	1,000	0,00					
		cúpula	0,102		0,042									
capillas		altar	0,093	0,718	0,069	0,069	-0,002	0,959	0,03	-0,625	<0,001	7,81	5,31	
		cúpula	0,095	0,520	0,069	0,069								
nave		altar	0,095	0,710	0,033	0,027	-0,111	<0,001	1,38	-0,615	<0,001	7,69	6,11	
		cúpula	0,206	0,694	0,033	0,027								
transepto		altar	0,108	0,648	0,057	0,057	-0,038	0,339	0,48	-0,540	<0,001	6,75	5,63	
		cúpula	0,147	0,597	0,057	0,057								
tribuna		altar	0,087		0,057		-0,038	0,339	0,48					
		cúpula	0,125		0,057									

Tabla IV.2.2.17. Tabla 7. 1. Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			medido	sim	medido	sim							
IACCA_2000	ábside	altar	0,165		0,123		0,045	0,643	0,56				
		cúpula	0,120		0,123								
	balcones	altar	0,092		0,052		0,009	0,826	0,11				
		cúpula	0,083		0,052								
	capillas	altar	0,047	0,498	0,087	0,087	-0,013	0,855	0,16	-0,450	<0,001	5,63	
		cúpula	0,060	0,383	0,087	0,087				-0,323	0,010	4,03	
	nave	altar	0,096	0,591	0,041	0,033	-0,157	<0,001	1,96	-0,495	<0,001	6,19	
		cúpula	0,253	0,702	0,041	0,033				-0,449	<0,001	5,62	
	transepto	altar	0,090	0,685	0,071	0,071	-0,078	0,164	0,98	-0,595	<0,001	7,44	
		cúpula	0,168	0,657	0,071	0,071				-0,488	<0,001	6,10	
	tribuna	altar	0,112		0,071		-0,017	0,766	0,21				
		cúpula	0,128		0,071								
	IACCA_4000	ábside	altar	0,130		0,091		0,050	0,550	0,63			
			cúpula	0,080		0,091							
balcones		altar	0,085		0,039		-0,006	0,858	0,08				
		cúpula	0,092		0,039								
capillas		altar	0,038	0,703	0,065	0,065	-0,020	0,735	0,25	-0,665	<0,001	8,31	
		cúpula	0,058	0,720	0,065	0,065				-0,663	<0,001	8,28	
nave		altar	0,077	0,699	0,030	0,025	-0,209	<0,001	2,61	-0,622	<0,001	7,77	
		cúpula	0,286	0,775	0,030	0,025				-0,489	<0,001	6,11	
transepto		altar	0,093	0,815	0,053	0,053	-0,072	0,140	0,90	-0,722	<0,001	9,02	
		cúpula	0,165	0,737	0,053	0,053				-0,572	<0,001	7,15	
tribuna		altar	0,088		0,053		-0,057	0,243	0,71				
		cúpula	0,145		0,053								
IACCA_8000		ábside	altar	0,125		0,117		0,050	0,525	0,62			
			cúpula	0,075		0,117							
	balcones	altar	0,085		0,050		-0,002	0,957	0,02				
		cúpula	0,087		0,050								
	capillas	altar	0,045		0,083		-0,003	0,964	0,03				
		cúpula	0,048		0,083								
	nave	altar	0,097		0,039		-0,191	<0,001	2,38				
		cúpula	0,287		0,039								
	transepto	altar	0,092		0,068		-0,090	0,050	1,12				
		cúpula	0,182		0,068								
	tribuna	altar	0,147		0,068		-0,015	0,741	0,19				
		cúpula	0,162		0,068								

La tabla IV.2.2.16 muestra la comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en la nave y el transepto, alcanzando los valores máximos de 0,082 y 0,153 a 500 Hz respectivamente.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en dos casos, correspondiendo a la zona la nave a 5000 y 1000 Hz.

A nivel de percepción, únicamente se supera 1 JND en la nave a frecuencias medias y en el transepto a 500 Hz, con valores que no llegan a los 2 JND.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real, aumentan con la frecuencia. Los mayores valores se encuentran a 1000 Hz, alcanzando el valor de 0,6 en la zona de la nave y las capillas.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos menos uno.

En términos de percepción, se superan los 2 JND en todas las zonas a partir de 500 Hz.

La tabla IV.2.2.17 muestra la comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a Frecuencias de 2000 a 8000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

Los resultados son similares a los obtenidos a frecuencias bajas y medias. En cuanto a la posición de la fuente las mayores diferencias se encuentran en la nave con valores entorno a 0,2, diferencia estadísticamente significativa superando 1 JND en esa zona.

En cuanto a la validez de la simulación, los resultados son malos, con diferencias que alcanzan el valor de 0,6-0,7. Además existe diferencia estadísticamente significativa y se superan los 2 JND de diferencia en todos los casos.

En un 44% de los casos la diferencia entre los valores medidos y simulados de IACCA es inferior a 2 JND, con la particularidad de que se localizan todos a frecuencias bajas.

Se han comparado los valores obtenidos con los de nueve iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% de volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006). El rango de valores para el índice de correlación cruzada interaural es de un máximo de 0,469 y un mínimo de 0,245, siendo el valor medio igual a 0,365. De acuerdo con estos datos, se puede considerar que el parámetro IACC en la Basílica para el Misteri tiene valores bajos, ligeramente por debajo de los habituales en este tipo de espacios.

El parámetro IACC indica el grado de similitud que existe entre la señal que llega a un oído y a otro. Un valor de 1 indica que las señales son iguales, un

valor de 0 indica que no existe relación entre ellas. Los valores obtenidos se encuentran en torno a 0,2 para frecuencias medias y altas, por lo que existe una diferencia perceptible considerable entre ambos oídos en todas las zonas. No obstante, dicha diferencia no se reproduce en la simulación.

El segundo parámetro empleado para caracterizar la espacialidad de la Basílica es el índice de fracción de energía lateral LF.

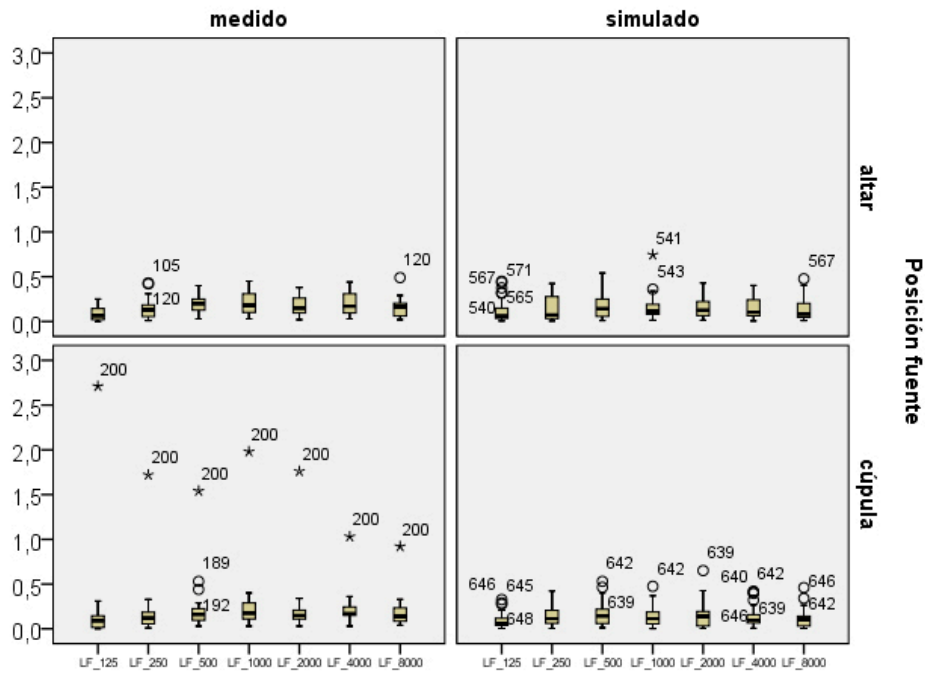


Figura IV.2.2.36. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro LF por frecuencias.

La figura IV.2.2.36 recoge el diagrama de cajas con los resultados obtenidos para todos los puntos de medida por frecuencias de la parámetro LF. La variabilidad entre puntos no es excesiva, situándose la mayoría de los valores entre 0,2-0,3. Los puntos espurios son aislados en el caso de las medidas pero más numerosos en las simulaciones, sobre todo cuando la fuente se sitúa en la cúpula apuntando a problemas en la calibración de este parámetro. Destaca el punto 200 para la posición de la fuente en la cúpula, que se distancia considerablemente del resto. Dado que este punto sólo presenta un comportamiento anómalo en este parámetro, se puede determinar que no es debido a un error en la medida sino a una causa que afecta exclusivamente al parámetro LF.

La figura IV.2.2.37 muestra los valores de LF promedio de sala por frecuencias medidos e n l a Basílica para el Misteri, una vez c onfigurada p ara l a representación teatral, y obtenidos en la simulación, para las dos posiciones de fuente. Se observa que las líneas que representan los valores medidos son muy similares a frecuencias medias y altas aunque ligeramente desplazadas (del or den de 0, 04 unidades). Lo mismo ocurre c on los d os casos de simulaciones, que se asemejan entre sí, pero difieren ligeramente por debajo (en torno a 0,03-0,05 unidades) de los valores reales a frecuencias medias y altas.

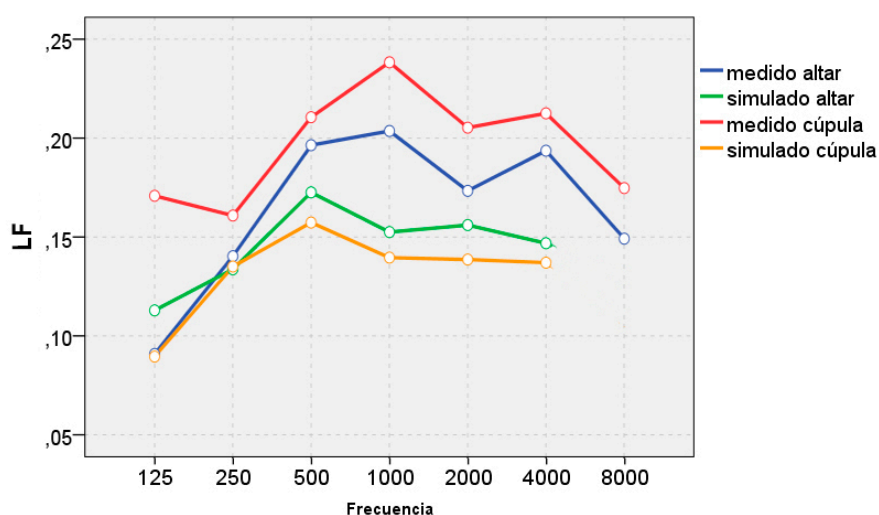


Figura IV.2.2.37. Valores de LF promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.

En las figuras IV.2.2.38 y IV.2.2.39 se observa como al desglosar los valores por zonas el comportamiento entre unas y otras varía. Los valores en la zona de la nave son siempre inferiores al resto de zonas, alcanzando los máximos en las capillas y el transepto. Los valores en el ábside y la tribuna varían con la frecuencia, asemejándose a los de la nave en el rango comprendido entre 125 y 500 Hz y aproximándose a los de las capillas y el transepto a partir de 100 Hz.

Desde el punto de vista de la fuente, se observa que el comportamiento difiere entre ambos casos, sobre todo en el transepto y el ábside.

En cuanto a la calibración, las dos simulaciones se ajustan perfectamente en la nave pero se alejan en las capillas para el caso de la fuente en el altar y en el transepto para la fuente en la cúpula.

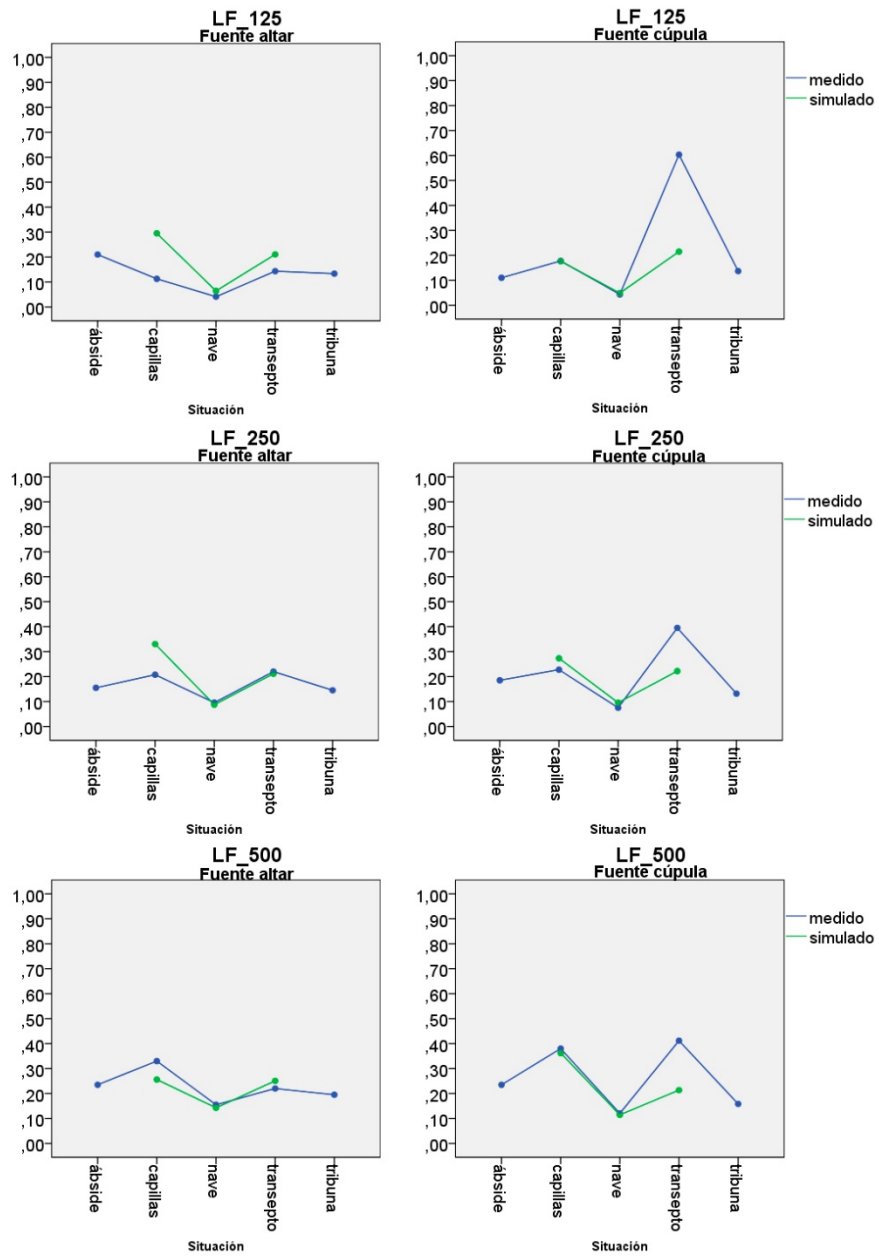


Figura IV.2.2.38. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

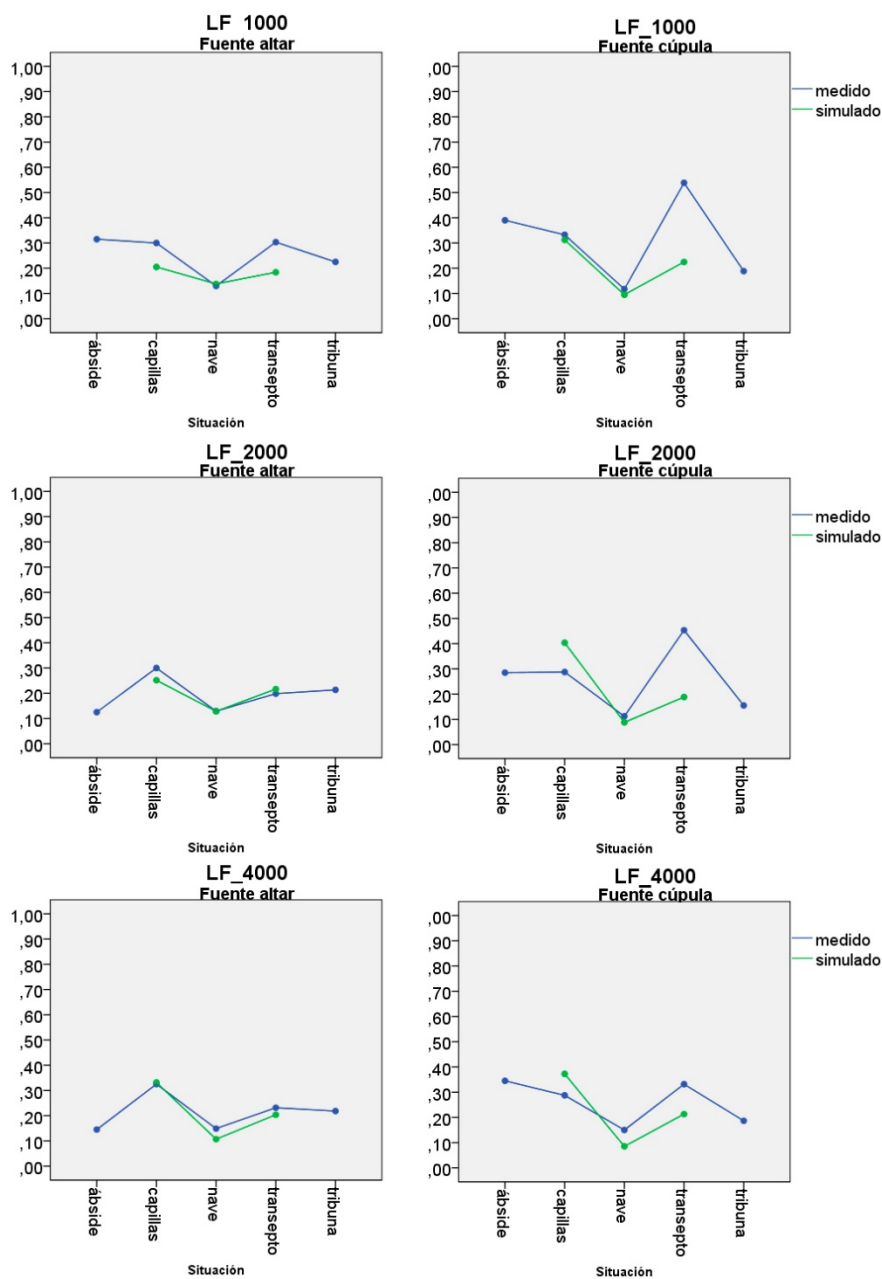


Figura IV.2.2.39. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.

Tabla IV.2.2.18. Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.	
			medido	sim	medido	sim							
			medido	sim	medido	sim							
LF_125	ábside	altar	0,210		0,151		0,100	0,641	2,00				
		cúpula	0,110		0,151								
	capillas	altar	0,113	0,295	0,107	0,107	-0,065	0,668	1,30	-0,182	0,230	3,65	
		cúpula	0,178	0,176	0,107	0,107				0,001	0,692	0,03	
	nave	altar	0,041	0,064	0,050	0,041	-0,002	0,975	0,04	-0,023	0,723	0,46	
		cúpula	0,043	0,049	0,050	0,041				-0,005	0,933	0,11	
	transepto	altar	0,143	0,210	0,087	0,087	-0,460	<0,001	9,20	-0,067	0,588	1,34	
		cúpula	0,603	0,215	0,087	0,087				0,388	0,002	7,77	
	tribuna	altar	0,133		0,087		-0,003	0,979	0,07				
		cúpula	0,137		0,087								
	LF_250	ábside	altar	0,155		0,108		-0,030	0,845	0,60			
			cúpula	0,185		0,108							
capillas		altar	0,208	0,330	0,076	0,076	-0,020	0,853	0,40	-0,123	0,258	2,46	
		cúpula	0,228	0,273	0,076	0,076				-0,046	0,672	0,92	
nave		altar	0,096	0,087	0,036	0,029	0,021	0,687	0,41	0,008	0,859	0,17	
		cúpula	0,075	0,095	0,036	0,029				-0,020	0,663	0,41	
transepto		altar	0,220	0,212	0,062	0,062	-0,175	0,049	3,50	0,008	0,924	0,17	
		cúpula	0,395	0,222	0,062	0,062				0,173	0,052	3,46	
tribuna		altar	0,145		0,062		0,013	0,880	0,27				
		cúpula	0,132		0,062								
LF_500		ábside	altar	0,235		0,101		0,000	1,000	0,00			
			cúpula	0,235		0,101							
	capillas	altar	0,330	0,256	0,071	0,071	-0,050	0,621	1,00	0,074	0,465	1,48	
		cúpula	0,380	0,362	0,071	0,071				0,018	0,650	0,36	
	nave	altar	0,155	0,143	0,034	0,027	0,034	0,470	0,69	0,012	0,779	0,24	
		cúpula	0,121	0,114	0,034	0,027				0,006	0,889	0,12	
	transepto	altar	0,220	0,251	0,058	0,058	-0,192	0,021	3,83	-0,031	0,710	0,61	
		cúpula	0,412	0,214	0,058	0,058				0,198	0,018	3,96	
	tribuna	altar	0,195		0,058		0,037	0,657	0,73				
		cúpula	0,158		0,058								
	LF_1000	ábside	altar	0,315		0,119		-0,075	0,656	1,50			
			cúpula	0,390		0,119							
capillas		altar	0,300	0,205	0,084	0,084	-0,033	0,785	0,65	0,095	0,425	1,90	
		cúpula	0,333	0,312	0,084	0,084				0,020	0,865	0,41	
nave		altar	0,129	0,138	0,040	0,032	0,012	0,828	0,24	-0,008	0,672	0,17	
		cúpula	0,117	0,095	0,040	0,032				0,022	0,665	0,44	
transepto		altar	0,303	0,184	0,069	0,069	-0,235	0,017	4,70	0,119	0,221	2,39	
		cúpula	0,538	0,225	0,069	0,069				0,313	0,002	6,27	
tribuna		altar	0,225		0,069		0,037	0,706	0,73				
		cúpula	0,188		0,069								

Tabla IV.2.2.19. Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.

Frecuenc	Zona	Fuente	Media		Error estándar		Dif. fuente	p	JND fuente	Dif. sim.	p	JND sim.
			med	sim	med	sim						
			medido	sim	medido	sim						
LF_2000	ábside	altar	0,125		0,109		-0,160	0,302	3,20			
		cúpula	0,285		0,109							
	capillas	altar	0,300	0,252	0,077	0,077	0,012	0,909	0,25	0,048	0,658	0,97
		cúpula	0,288	0,404	0,077	0,077						
	nave	altar	0,129	0,128	0,036	0,030	0,017	0,746	0,33	0,000	0,992	0,01
		cúpula	0,112	0,088	0,036	0,030						
	transepto	altar	0,198	0,216	0,063	0,063	-0,255	0,005	5,10	-0,018	0,839	0,36
		cúpula	0,453	0,188	0,063	0,063						
	tribuna	altar	0,213		0,063		0,058	0,514	1,17			
		cúpula	0,155		0,063							
LF_4000	ábside	altar	0,145		0,074		-0,200	0,058	4,00			
		cúpula	0,345		0,074							
	capillas	altar	0,325	0,331	0,052	0,052	0,038	0,613	0,75	-0,006	0,931	0,13
		cúpula	0,288	0,372	0,052	0,052						
	nave	altar	0,149	0,107	0,025	0,020	-0,001	0,975	0,02	0,042	0,189	0,84
		cúpula	0,150	0,085	0,025	0,020						
	transepto	altar	0,232	0,204	0,043	0,043	-0,100	0,100	2,00	0,028	0,645	0,56
		cúpula	0,332	0,213	0,043	0,043						
	tribuna	altar	0,218		0,043		0,032	0,601	0,63			
		cúpula	0,187		0,043							
LF_8000	ábside	altar	0,150		0,068		-0,095	0,328	1,90			
		cúpula	0,245		0,068							
	capillas	altar	0,230		0,048		-0,060	0,383	1,20			
		cúpula	0,290		0,048							
	nave	altar	0,102		0,023		-0,006	0,864	0,11			
		cúpula	0,108		0,023							
	transepto	altar	0,265		0,040		-0,048	0,389	0,97			
		cúpula	0,313		0,040							
	tribuna	altar	0,120		0,040		-0,017	0,766	0,33			
		cúpula	0,137		0,040							

La tabla IV.2.2.18 muestra la comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1 000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

En cuanto a la posición de la fuente, en términos de valor real, las mayores diferencias se encuentran en el transepto a frecuencias bajas y medias, alcanzando el valor máximo de 0,46 a 125 Hz, y con valores en torno a 0,2 a las demás frecuencias. Las capillas y el ábside presentan diferencias del orden de 0,1 mientras que en la nave y la tribuna se sitúan en torno a 0,02-0,03.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en el transepto a todas las frecuencias.

A nivel de percepción, las diferencias superan 1 JND a todas las frecuencias en la zona del transepto, a 125 y 500 en las capillas, y a 125 y 1000 en el ábside.

En cuanto a la calibración del modelo y validación de la simulación, las diferencias obtenidas en términos de valor real son mayores también en el transepto.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa en el transepto.

En términos de percepción, se superan los 2 JND en las capillas a frecuencias bajas y en el transepto a bajas y medias.

La tabla IV.2.2.19 muestra la comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente estudiadas, a frecuencias de 125 a 1000 Hz. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND para la diferencia de valores medidos entre una fuente y otra y los 2 JND entre medidas y simulación.

De nuevo las mayores diferencias se encuentran en el transepto, pero aumentan las existentes en el ábside, superando 1 JND entre posiciones de fuente a todas las frecuencias en esta última zona y también en la tribuna y las capillas en casos aislados.

En cuanto a la validez de la simulación, se superan los 2 JND de diferencia en el transepto a todas las frecuencias y en las capillas a 2000 Hz para la fuente en la cúpula.

En un 72% de los casos las diferencias entre los valores medidos y simulados son inferiores a 2 JND.

Se han comparado los valores obtenidos con los de nueve iglesias de volúmenes similares (tomando como intervalo un 30% del volumen de la Basílica de Santa María) estudiadas por diferentes autores (Cirillo y Martellotta, 2002; Cirillo y Martellotta, 2006). El rango de valores para el índice de fracción lateral es de un máximo de 0,304 y un mínimo de 0,175, siendo el valor medio igual a 0,248, por lo que la Basílica de Santa María se puede considerar dentro de los valores habituales para este tipo de espacios, situándose en la media.

Los valores de LF son directamente proporcionales a la cualidad de espacialidad de la sala.

IV.2.2.5. Conclusiones

A modo de resumen, la figura IV.2.2.40 representa todos los parámetros analizados y cuáles de ellos superan los 2 JND de diferencia entre medidas y simulación en función de la posición de la fuente y de la zona en la que se ubica el receptor. Al igual que ocurría para la configuración de culto, se observa claramente que los principales problemas se presentan en los parámetros G e IACCA, en los que la simulación falla en todas las situaciones. El parámetro C50 presenta problemas en las capillas y el LF en el transepto. Prácticamente no existe diferencia en función de la posición de la fuente, salvo casos aislados

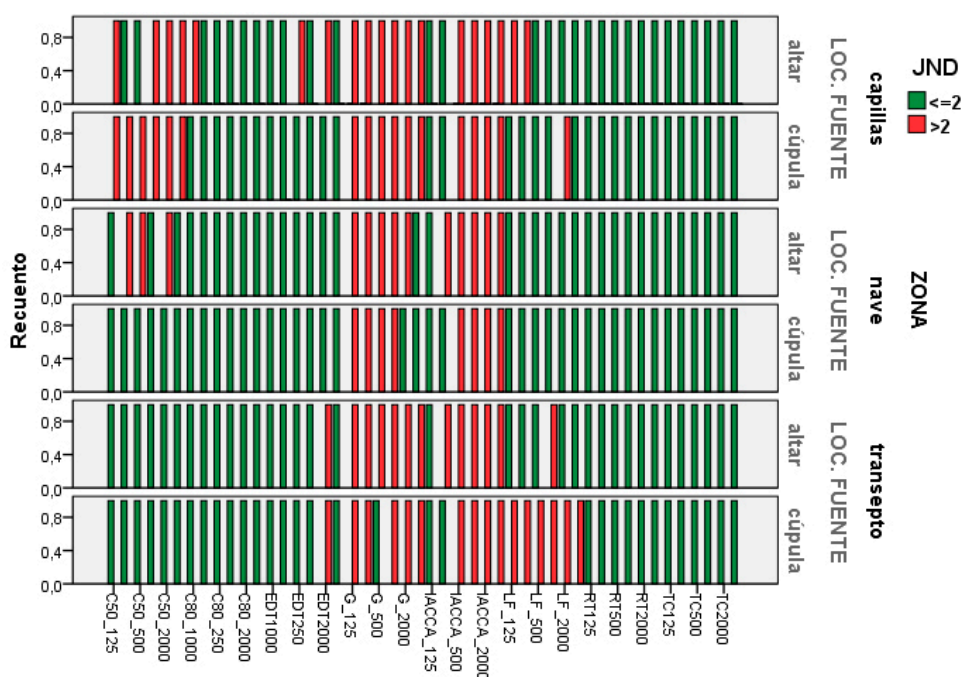


Figura IV.2.2.40. Parámetros que superan los 2 JND de diferencia entre medida y simulación en función de la frecuencia, la posición de la fuente y la zona en la que se ubica el receptor para la configuración del Misteri.

Por otra parte, la figura IV.2.2.41 muestra los valores medios en JND de las diferencias entre medidas y simulaciones para los parámetros estudiados por frecuencias para las tres zonas en las que se ha realizado la simulación. Se observa que aunque el comportamiento de cada uno de los parámetros es similar en las tres zonas existen diferencias entre unas y otras.

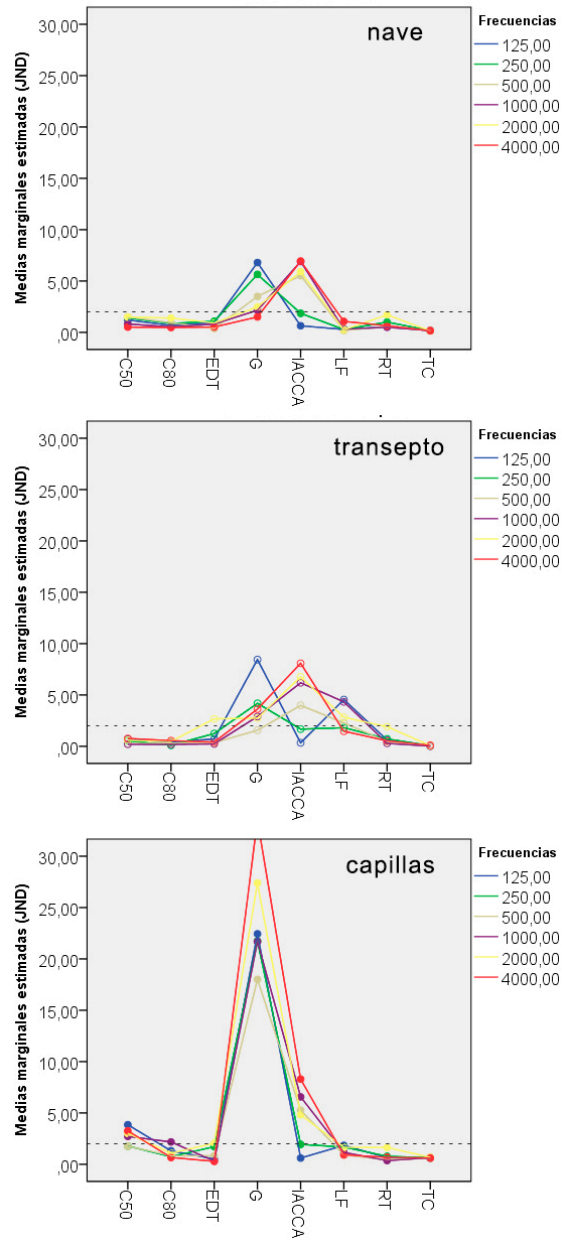


Figura IV.2.2.41. Diferencias en JND obtenidas en la simulación respecto a las medidas para cada uno de los parámetros analizados por zonas y frecuencias.

La nave es la zona en la se logra mayor ajuste en la simulación. Para todas las frecuencias, los parámetros C50, C80, EDT, LF RT y Ts se mantienen dentro de los 2 JND admisibles. El parámetro G se ajusta mejor a frecuencias altas, situándose en el límite admisible mientras que en el caso del IACCA ocurre al contrario, ajustándose a frecuencias bajas, pero no a medias y altas.

En el transepto, los parámetros de energía C50, C80 y Ts se mantienen dentro de los 2 JND para todas las frecuencias. Los de reverberación, EDT y RT se encuentran a l límite p ara l a frecuencia de 2 000 H z, mientras q ue los espaciales y el energético G superan la diferencia de 2 JND alcanzando los 8 JND a 125Hz en el caso de G y a 4000 Hz en el del IACCA.

En las capillas, los resultados se asemejan a los de la nave. Los parámetros EDT, L F RT y Ts, s e m antienen p or deba jo d e l os 2 J ND, pero e l C50 únicamente se ajusta a 500 Hz y el C80 presenta problemas a 1000 Hz. G se dispara llegando a más de 30 JND a 4000 Hz.

A pesar de que el comportamiento en cada zona varía respecto a lo que ocurría para el uso del culto, en lo referente a los parámetros los resultados confirman las conclusiones extraídas en el capítulo anterior.

Los parámetros de reverberación son muy homogéneos, permiten un análisis global a nivel de sala ya que no presentan diferencias importantes entre unas zonas y otras, y se ajustan bien en la simulación.

Los parámetros de energía no son homogéneos, es necesario un análisis por zonas y a que el c omportamiento v aría de unas a ot ras, y s e a justan relativamente bien la simulación, a excepción del parámetro G, aunque presentan diferencias en algunos puntos.

Los parámetros de espacialidad no son homogéneos, requieren de un análisis por zonas y además se ajustan mal en la simulación por lo que los valores que aportan no pueden considerarse como buenos.

IV.2.3.

Variaciones en función del uso

IV.2.3.1. Influencia de los cambios espaciales para los dos usos principales

Como se ha comentado en el capítulo anterior, para la representación del Misteri, se introducen una serie de cambios en el espacio interior de la Basílica. La cúpula se cubre con una lona pintada que representa el cielo, se modifica la distribución del mobiliario y se colocan unas estructuras de madera en la nave y el crucero, como puede verse en la figura IV.2.3.1.

Como consecuencia de ello las características geométricas de la Basílica son diferentes, tal y como recoge la tabla IV.2.3.1. Se produce una disminución del volumen, lo que repercute en el comportamiento acústico de la sala como se mostrará más adelante.



Figura IV.2.3.1. Fotografía interior de la Basílica con la configuración habitual a la izquierda, y con las estructuras que se introducen para la celebración del Misteri a la derecha.

Tabla IV.2.3.1. Características geométricas generales de la sala para los dos usos principales.

Culto	Misteri
Volumen: 25000 m ³	Volumen: 22600 m ³
Altura nave: 24 m	Altura nave: 24 m
Altura crucero: 40,80 m	Altura crucero: 24 m

IV.2.3.1.1 Variaciones en los parámetros de reverberación

Con el fin de determinar la influencia de los cambios espaciales que tienen lugar para la representación del Misteri en la Basílica sobre el comportamiento reverberante de la misma, se han comparado los resultados de las medidas de los parámetros RT y EDT.

La figura IV.2.3.2 recoge la representación gráfica por frecuencias de las medidas de RT tomadas en la Basílica con las dos configuraciones espaciales en todos los puntos, agrupándolos por zonas, así se puede distinguir. En las dos configuraciones espaciales, las líneas prácticamente horizontales demuestran la homogeneidad de los resultados en todos los puntos y zonas, únicamente se aprecian ligeras diferencias a frecuencias muy bajas.

Se aprecia claramente que la colocación del andador, tribunas y cadafal y la cubrición de la cúpula provocan una disminución del tiempo de reverberación a todas las frecuencias aunque no en igual medida. Así, se observa que las diferencias entre las dos configuraciones son superiores a 125 Hz, manteniéndose en el rango de 250 a 1000 Hz y pasando a ser prácticamente inexistentes a 4000 Hz.

Como cabía esperar, la reducción del volumen de la Basílica que se produce al introducir los nuevos elementos, así como la mayor absorción de la madera que compone las estructuras en comparación con otros materiales presentes en la Basílica, provoca un descenso del tiempo de reverberación.

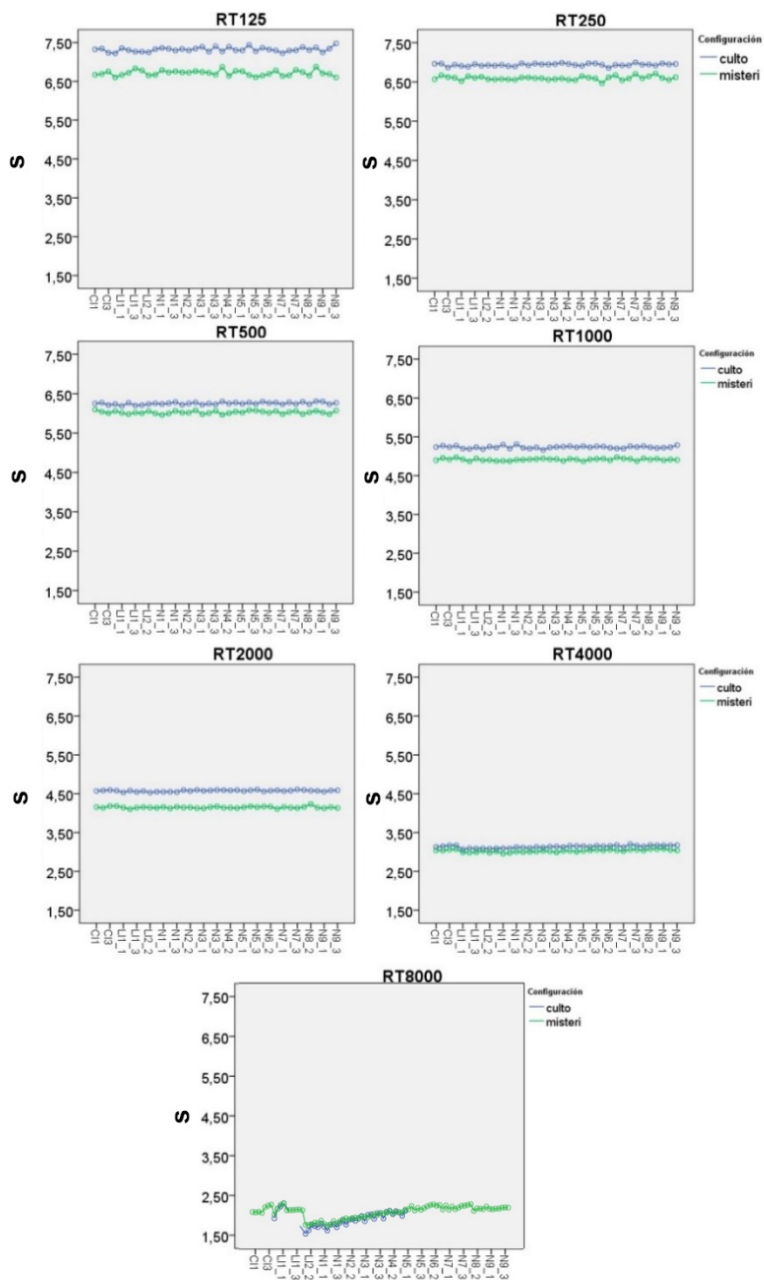


Figura IV.2.3.2. Valores de RT medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.2. Comparación de los valores medios de RT medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
RT125	7,471	6,725	0,027	0,020	0,747	< 0,001	2,00
RT250	7,154	6,572	0,017	0,013	0,582	< 0,001	1,63
RT500	6,673	6,086	0,012	0,010	0,587	< 0,001	1,76
RT1000	5,976	5,200	0,009	0,007	0,776	< 0,001	2,60
RT2000	4,799	4,112	0,007	0,006	0,687	< 0,001	2,86
RT4000	3,505	3,166	0,011	0,009	0,338	< 0,001	1,93
RT8000	2,105	2,191	,014	,011	-,086	< 0,001	0,82

Al comparar los valores medios de sala obtenidos en ambos casos, recogidos en la tabla IV.2.3.2 se observa la tendencia percibida en la representación por puntos. En términos de valor real, la disminución en el tiempo de reverberación de la sala que se produce por efecto de la adaptación para la representación no es elevada, y no alcanza en ningún caso el segundo. A 125 Hz la diferencia alcanza los 0,75 segundos, a frecuencias medias-bajas la diferencia es algo menor, en torno a medio segundo, volviendo a aumentar para alcanzar el máximo de 0,78 segundos a 1000 Hz y disminuyendo de nuevo a 4000 para casi desaparecer a 8000 Hz.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos.

En términos de percepción, las diferencias son apreciables a todas las frecuencias, excepto a 8000 Hz. Las mayores diferencias se encuentran a 1000 y 2000 Hz.

Al realizar el análisis por zonas que muestra la tabla IV.2.3.3, los resultados son similares a los generales de sala con algunas variaciones. Para las frecuencias comprendidas entre 125 y 4000 Hz el tiempo de reverberación medio de las tres zonas es superior para la configuración de culto. Las mayores diferencias en términos de valor real se encuentran a las frecuencias de 125 y 1000 Hz, siendo siempre ligeramente superiores en la nave que en las capillas o el transepto. A 8000 Hz el comportamiento es diferente de lo que se observa a las frecuencias, siendo superior el tiempo de reverberación medio en todas las zonas para la configuración del Misteri

Tabla IV.2.3.3. Comparación de los valores medios de RT medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
RT125	capillas	7,411	6,691	0,060	0,045	0,720	< 0,001	1,94
	nave	7,525	6,742	0,023	0,023	0,783	< 0,001	2,08
	transepto	7,478	6,740	0,049	0,034	0,738	< 0,001	1,97
RT250	capillas	7,120	6,586	0,039	0,029	0,534	< 0,001	1,50
	nave	7,245	6,554	0,015	0,015	0,691	< 0,001	1,91
	transepto	7,098	6,577	0,032	0,022	0,521	< 0,001	1,47
RT500	capillas	6,638	6,103	0,028	0,021	0,535	< 0,001	1,61
	nave	6,740	6,079	0,011	0,011	0,661	< 0,001	1,96
	transepto	6,642	6,078	0,023	0,016	0,564	< 0,001	1,70
RT1000	capillas	5,974	5,211	0,021	0,016	0,762	< 0,001	2,55
	nave	6,019	5,215	0,008	0,008	0,804	< 0,001	2,67
	transepto	5,934	5,173	0,017	0,012	0,761	< 0,001	2,56
RT2000	capillas	4,816	4,136	0,017	0,013	0,681	< 0,001	2,83
	nave	4,846	4,118	0,006	0,006	0,728	< 0,001	3,00
	transepto	4,736	4,083	0,014	0,010	0,653	< 0,001	2,76
RT4000	capillas	3,513	3,194	0,025	0,019	0,319	< 0,001	1,82
	nave	3,584	3,170	0,010	0,010	0,414	< 0,001	2,31
	transepto	3,418	3,135	0,021	0,015	0,282	< 0,001	1,65
RT8000	capillas	2,163	2,241	0,031	0,023	-0,079	0,044	0,73
	nave	2,189	2,195	0,012	0,012	-0,006	0,701	0,06
	transepto	1,963	2,137	0,025	0,018	-0,174	< 0,001	1,77

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos excepto para la nave a 8000 Hz y muy poca significación en el caso de las capillas a la misma frecuencia.

En términos de percepción, al igual que ocurría con los valores generales, existen diferencias perceptibles a todas las frecuencias excepto 8000 Hz, destacando las frecuencias de 1000 y 2000 Hz en las que se rondan los 3 JND.

La nave es la zona en la que se aprecian mayores diferencias ya que es el espacio que se ve más alterado al introducir el andador central y las tribunas laterales.

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, el tiempo de reverberación RT es un parámetro muy homogéneo que se comporta de manera similar en todas las zonas para cada configuración.

Dado el gran volumen de aire existente en la Basílica, la disminución del mismo provocada por los cambios espaciales no afecta en gran medida a su comportamiento reverberante aunque sí puede percibirse una reducción entorno a medio segundo en el parámetro RT que se traduce en diferencias de en torno a 2,5 JND entre una configuración y otra en todas las zonas de la Basílica a frecuencias medias.

No ocurre lo mismo en el caso del EDT. A título ilustrativo, la figura IV.2.3.3 muestra la representación gráfica de los valores de EDT medidos por puntos. Se observa que la variabilidad por puntos es mucho mayor en este caso, sobre todo para frecuencias bajas y en mayor medida para la configuración del Misteri. Dicha variabilidad se mantiene en todas las zonas, no apreciándose diferencias considerables entre unas y otras aunque sí se perciben variaciones menores entre los puntos ubicados en el transepto a frecuencias medias y altas. Destacan también los puntos de los balcones en los que a frecuencias medias se observan disparidades de hasta 1 segundo entre unos puntos y otros.

La tendencia es muy similar en ambas configuraciones aunque los valores de EDT son en general inferiores para el caso del Misteri, solapándose en algunos puntos a casi todas las frecuencias y completamente a 4000 Hz.

Si se analizan los valores medios globales de sala, incluidos en la tabla IV.2.3.4, se observa que las diferencias entre una configuración y otra son mayores a frecuencias medias, en las que alcanzan los 0,8 segundos en términos de valor real. Las diferencias se sitúan en torno al medio segundo para frecuencias bajas y van disminuyendo a partir de 1000 Hz a medida que aumenta la frecuencia hasta igualarse entre y volviendo a aumentar a 8000 Hz.

Estadísticamente existen diferencias significativas en todos los casos.

En cuanto a la percepción, los resultados son equivalentes a los valores reales. Las diferencias superan 1 JND a todas las frecuencias, siendo superiores a frecuencias medias y alcanzando el máximo de 2,76 JND a 1000 Hz.

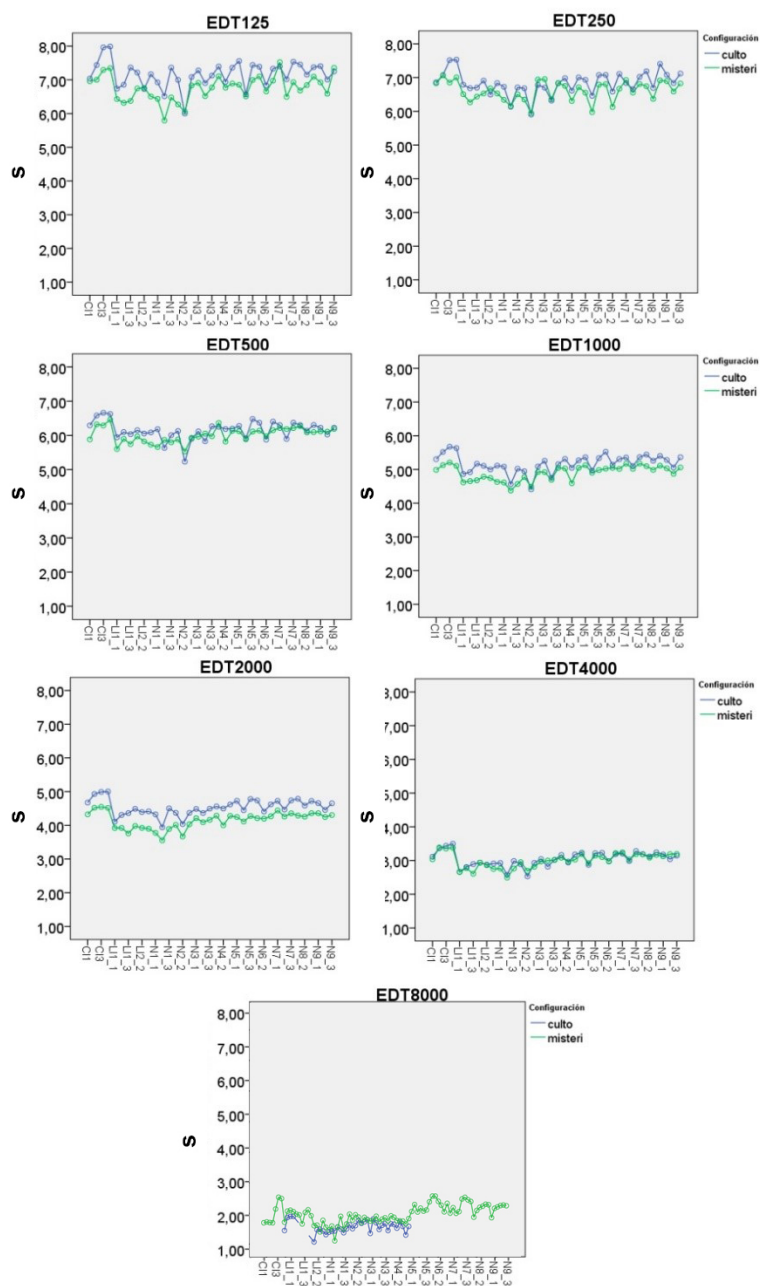


Figura IV.2.3.3. Valores de EDT medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.4. Comparación de los valores medios de EDT medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
EDT125	7,218	6,764	0,105	0,080	0,454	0,001	1,26
EDT250	7,152	6,556	0,081	0,062	0,596	< 0,001	1,67
EDT500	6,819	6,069	0,043	0,033	0,750	< 0,001	2,20
EDT1000	6,004	5,176	0,040	0,030	0,828	< 0,001	2,76
EDT2000	4,759	4,129	0,042	0,032	0,630	< 0,001	2,65
EDT4000	3,265	3,098	0,036	0,027	0,167	< 0,001	1,03
EDT8000	1,947	2,123	0,031	0,024	-0,177	< 0,001	1,82

Tabla IV.2.3.5. Comparación de los valores medios de EDT medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente		Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
		culto	misteri	culto	misteri			
EDT125	capillas	7,584	7,163	0,233	0,176	0,421	0,152	1,11
	nave	7,276	6,678	0,090	0,090	0,599	< 0,001	1,65
	transepto	6,792	6,451	0,191	0,135	0,341	0,146	1,00
EDT250	capillas	7,640	6,743	0,180	0,136	0,897	< 0,001	2,35
	nave	7,048	6,504	0,069	0,069	0,544	< 0,001	1,54
	transepto	6,768	6,421	0,147	0,104	0,347	0,056	1,03
EDT500	capillas	7,048	6,239	0,096	0,073	0,809	< 0,001	2,30
	nave	6,856	6,122	0,037	0,037	0,734	< 0,001	2,14
	transepto	6,553	5,846	0,079	0,056	0,706	< 0,001	2,16
EDT1000	capillas	6,250	5,351	0,088	0,067	0,899	< 0,001	2,88
	nave	6,094	5,277	0,034	0,034	0,817	< 0,001	2,68
	transepto	5,668	4,900	0,072	0,051	0,768	< 0,001	2,71
EDT2000	capillas	5,011	4,369	0,093	0,071	0,643	< 0,001	2,56
	nave	4,861	4,231	0,036	0,036	0,630	< 0,001	2,59
	transepto	4,406	3,788	0,076	0,054	0,617	< 0,001	2,80
EDT4000	capillas	3,495	3,354	0,080	0,060	0,141	0,160	0,81
	nave	3,411	3,152	0,031	0,031	0,260	< 0,001	1,52
	transepto	2,890	2,789	0,065	0,046	0,101	0,209	0,70
EDT8000	capillas	2,069	2,312	0,069	0,052	-0,243	0,006	2,35
	nave	2,071	2,185	0,027	0,027	-0,114	0,003	1,10
	transepto	1,700	1,873	0,057	0,040	-0,173	0,013	2,04

Tal y como muestra la tabla IV.2.3.5, a determinadas frecuencias se observan diferencias considerables entre unas zonas y otras. En general se han detectado mayores diferencias en función de la configuración espacial en la zona de las capillas, que se aproximan al segundo para las frecuencias entre 250 y 1000 Hz. En el caso del transepto la diferencia entre valores medios es menor a frecuencias bajas y va aumentando con la frecuencia, para volver a disminuir a frecuencias altas. Algo similar ocurre en la nave aunque de manera menos acentuada. A 4000 Hz se produce una singularidad, disminuyendo notablemente la diferencia de valores medios en las capillas y el transepto.

En términos de percepción ocurre lo mismo. Para el caso de las capillas los cambios espaciales provocan cambios que superan los 2 JND a casi todas las frecuencias. Lo mismo ocurre con la nave y el transepto a frecuencias medias. Los únicos casos en los que no existen diferencias perceptibles corresponden con las capillas y el transepto a la frecuencia de 4000 Hz.

Existe diferencia estadísticamente significativa en casi todos los casos, a excepción de las capillas y el transepto a 125 y 4000 Hz.

IV.2.3.1.2 Variaciones en los parámetros de energía

Los gráficos incluidos en la figura IV.2.3.4 muestran los resultados del parámetro C50 en cada una de las posiciones de medida para las dos configuraciones espaciales. La variabilidad en este parámetro es considerablemente superior a la existente en los parámetros vinculados con la reverberación de la sala. Se aprecia claramente una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas, un segundo grupo correspondiente al transepto que se asemeja más a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico. El comportamiento es muy similar para ambas configuraciones mejorando ligeramente los valores en el caso del Misteri debido a la mayor absorción y menor reverberación comentada en el apartado anterior, que aporta una claridad del habla algo superior.

Los puntos medidos en la nave aportan varios datos interesantes. En primer lugar se observa como el valor de C50 medido disminuye a medida que aumenta la distancia entre el receptor y la fuente. Esto ocurre de manera más acusada a frecuencias medias. Del mismo modo se aprecia una diferencia entre los puntos de la misma fila de bancos, siendo considerablemente mejor el comportamiento en las posiciones medidas en el centro de la nave respecto a los laterales. Esto se aprecia significativamente para el caso del culto a las frecuencias de 1000 y 2000 Hz. En la configuración del Misteri se repite el fenómeno pero de manera más atenuada.

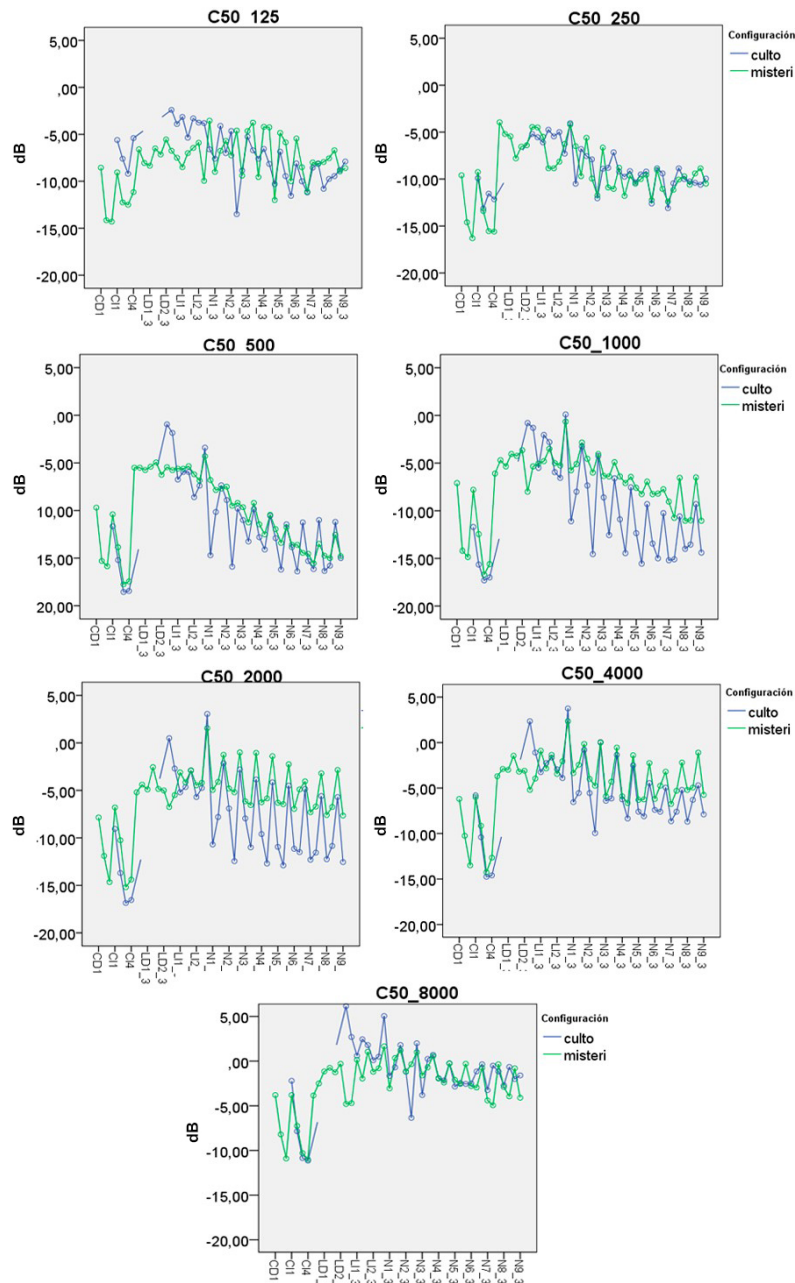


Figura IV.2.3.4. Valores de C50 medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.6. Comparación de los valores medios de C50 medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
C50_125	-6,261	-8,667	0,485	0,369	2,406	0,000	1,60
C50_250	-8,795	-9,775	0,472	0,360	0,980	0,101	0,65
C50_500	-11,089	-10,394	0,619	0,472	-0,695	0,374	0,46
C50_1000	-9,662	-8,166	0,563	0,429	-1,496	0,036	1,00
C50_2000	-8,547	-6,885	0,568	0,433	-1,662	0,021	1,11
C50_4000	-6,123	-5,628	0,526	0,400	-0,495	0,455	0,33
C50_8000	-2,291	-3,721	0,438	0,334	1,429	0,010	0,95

La tabla IV.2.3.6 muestra la comparación entre los valores medios de sala para el parámetro C50. A medida que aumenta la frecuencia los valores medios de sala de C50 disminuyen para las dos configuraciones, no obstante, esta tendencia se invierte a partir de 1000 Hz y vuelven a aumentar. Como se puede observar, la mayor diferencia se obtiene a 125 Hz, alcanzando los 2,4 dB. Cabe también mencionar las existentes a 1000 y 2000 Hz que se sitúan en torno a 1,5 dB.

Desde el punto de vista estadístico, las diferencias son significativas a las tres frecuencias mencionadas, con escasa significación en los dos últimos casos.

En términos de percepción, puede considerarse que prácticamente no hay diferencia ya que sólo se supera el valor de 1 JND en dos casos y por muy poco, sin llegar a aproximarse a los 2 JND.

La tabla IV.2.3.7 muestra los resultados del parámetro C50 por zonas. En este caso, el análisis zonal difiere del general descrito anteriormente. Al igual que mostraban los resultados globales, a medida que aumenta la frecuencia los valores medios de sala de C50 disminuyen para las dos configuraciones invirtiéndose a partir de 1000 Hz que vuelve a aumentar. No obstante, al comparar los valores por zonas se observan mayores diferencias. Se puede detectar que la diferencia máxima detectada a nivel global para la frecuencia de 125 Hz es debida a los puntos de las capillas y el transepto pero no de la nave.

Tabla IV.2.3.7. Comparación de los valores medios de C50 medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
C50_125	capillas	-6,950	-11,707	1,080	0,817	4,757	0,001	3,17
	nave	-8,191	-7,269	0,416	0,416	-0,922	0,119	0,61
	transepto	-3,642	-7,025	0,882	0,624	3,383	0,002	2,26
C50_250	capillas	-11,688	-13,471	1,052	0,795	1,784	0,178	1,19
	nave	-9,356	-9,550	0,405	0,405	0,194	0,735	0,13
	transepto	-5,342	-6,304	0,859	0,607	0,963	0,361	0,64
C50_500	capillas	-15,963	-14,329	1,379	1,043	-1,634	0,346	1,09
	nave	-12,296	-11,246	0,531	0,531	-1,050	0,164	0,70
	transepto	-5,008	-5,608	1,126	0,796	0,600	0,664	0,40
C50_1000	capillas	-15,413	-12,671	1,255	0,948	-2,741	0,083	1,83
	nave	-10,506	-6,843	0,483	0,483	-3,663	<0,001	2,44
	transepto	-3,067	-4,983	1,024	0,724	1,917	0,129	1,28
C50_2000	capillas	-14,038	-11,579	1,265	0,956	-2,459	0,123	1,64
	nave	-8,163	-4,598	0,487	0,487	-3,565	<0,001	2,38
	transepto	-3,442	-4,479	1,033	0,730	1,037	0,413	0,69
C50_4000	capillas	-11,388	-10,286	1,170	0,885	-1,102	0,454	0,73
	nave	-5,506	-3,678	0,451	0,451	-1,828	0,005	1,22
	transepto	-1,475	-2,921	0,956	0,676	1,446	0,219	0,96
C50_8000	capillas	-8,013	-7,893	0,976	0,738	-0,120	0,922	0,08
	nave	-1,161	-1,498	0,376	0,376	0,337	0,527	0,22
	transepto	2,300	-1,771	0,797	0,564	4,071	<0,001	2,71

A frecuencias medias, en las que los valores generales mostraban diferencias en torno a 1,5 dB, se han detectado variaciones entre 2,5 y 3,5 dB para las capillas y la nave. El transepto es la zona que presenta menores diferencias entre las dos configuraciones espaciales, excepto a frecuencias muy bajas o muy altas, probablemente esto sea debido a la proximidad de los puntos a la fuente y a que la tribuna que se coloca en esta zona queda por detrás del receptor respecto a la posición de la fuente.

Existe diferencia estadísticamente significativa para las capillas a frecuencias muy bajas, la nave a frecuencias medias-altas y el transepto a frecuencias muy altas.

Desde el punto de vista de la percepción, las diferencias superan 1 JND en muchos más casos, variando la zona en función de la frecuencia. Únicamente es perceptible la diferencia en todas las zonas a la frecuencia de 1000 Hz.

Para el caso de la música, los resultados son similares. Los gráficos incluidos en la figura IV.2.3.5 muestran los resultados del parámetro C80 en cada una de las posiciones de medida para las dos configuraciones espaciales. La variabilidad en este parámetro es similar a la del parámetro C50, y considerablemente superior a la existente en los parámetros vinculados con la reverberación de la sala.

Se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas, un segundo grupo correspondiente al transepto que se aproxima a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico. El comportamiento es muy similar para ambas configuraciones mejorando ligeramente los valores en el caso de Misteri debido a la mayor absorción y menor reverberación y a comentadas, incrementando la claridad musical.

Los resultados registrados en la nave aportan varios datos interesantes. En primer lugar se observa como el valor de C80 medido disminuye al alejarse el receptor de la fuente, especialmente a frecuencias medias. Del mismo modo se aprecia una diferencia entre los puntos de la misma fila de bancos, siendo considerablemente mejor el comportamiento en las posiciones medidas en el centro de la nave respecto a los laterales. Esto se aprecia significativamente para el caso del culto a las frecuencias de 1000 y 2000 Hz. En la configuración del Misteri se repite el fenómeno pero de manera más atenuada.

Los valores generales de sala, recogidos en la tabla IV.2.3.8, muestran que a frecuencias bajas la Basílica se comporta ligeramente mejor en la configuración de culto y que ocurre lo contrario a frecuencias medias-altas igual que en el caso anterior las mayores variaciones entre valores medios se encuentran a 125, 1000 y 2000 Hz, sin superar los 2 dB.

Existe diferencia estadísticamente significativa a esas mismas frecuencias y a 8000 Hz.

En términos de percepción, puede considerarse que no existe diferencia ya que sólo se supera el valor de 1 JND en dos casos y por muy poco, sin llegar a aproximarse a 1,5 JND.

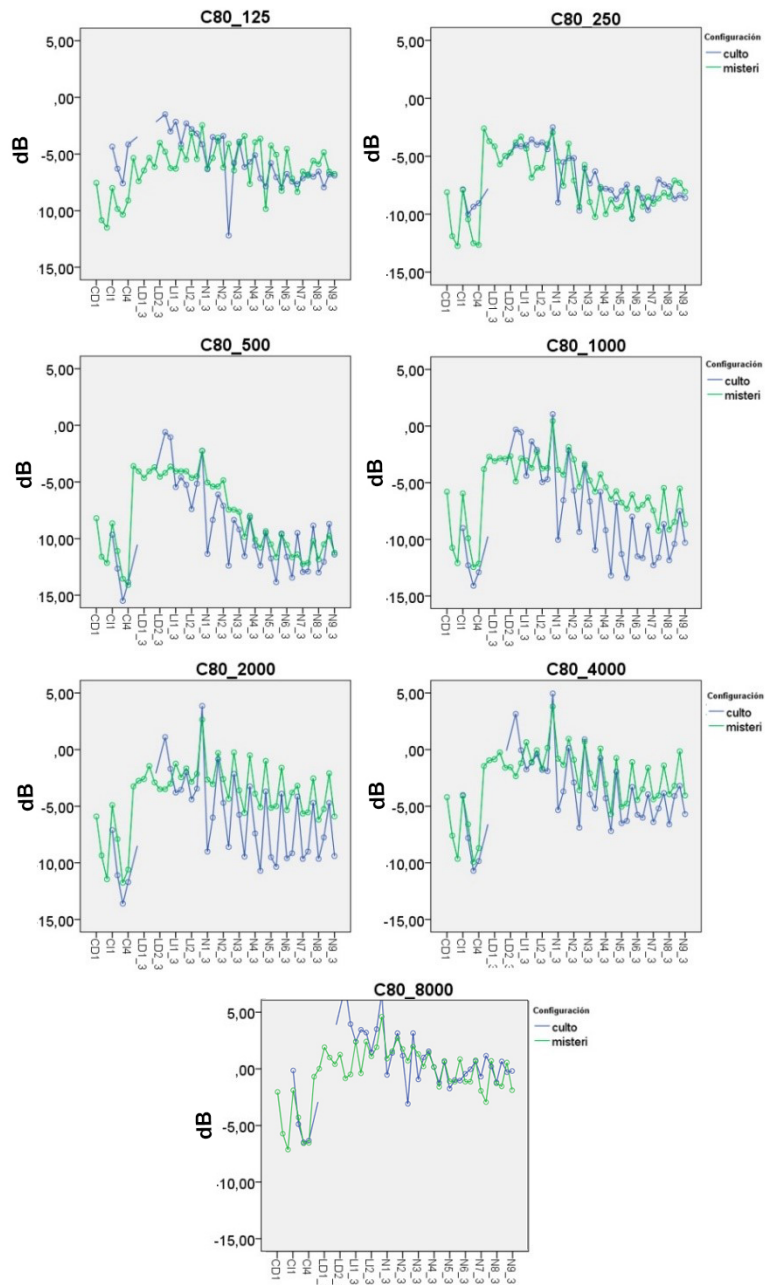


Figura IV.2.3.5. Valores de C80 medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.8. Comparación de los valores medios de C80 medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
C80_125	-4,850	-6,899	0,429	0,327	2,049	<0,001	1,37
C80_250	-6,819	-7,800	0,404	0,308	0,981	0,055	0,65
C80_500	-9,016	-8,127	0,511	0,389	-0,888	0,169	0,59
C80_1000	-7,632	-6,237	0,478	0,364	-1,395	0,022	0,93
C80_2000	-6,554	-4,918	0,481	0,366	-1,636	0,008	1,09
C80_4000	-4,103	-3,473	0,449	0,342	-0,630	0,266	0,42
C80_8000	-0,080	-1,277	0,363	0,277	1,197	0,010	0,80

Si se realiza la comparación por zonas, como recoge la tabla IV.2.3.9 se puede comprobar que igual que ocurría para los valores globales, a medida que aumenta la frecuencia los valores de C 80 disminuyen par a las dos configuraciones invirtiéndose a partir de 1000 Hz que vuelven a aumentar.

De nuevo, se puede atribuir la diferencia máxima detectada a nivel global para la frecuencia de 125 Hz a los puntos de las capillas y el transepto pero no a la nave, que presenta menores diferencias a frecuencias bajas. A frecuencias medias-altas, en las que los valores generales mostraban diferencias en torno a 1,5 dB, se han detectado variaciones entre 2 y 3 dB para las capillas y la nave. El transepto es la zona que presenta menores diferencias entre una configuración y otra, excepto a frecuencias muy bajas o muy altas, probablemente esto sea debido a la proximidad de los puntos a la fuente y a que la tribuna que se coloca en esta zona queda por detrás del receptor respecto a la posición de la fuente.

Existe diferencia estadísticamente significativa para las capillas a frecuencias muy bajas, la nave a frecuencias medias-altas y el transepto a frecuencias muy bajas y muy altas.

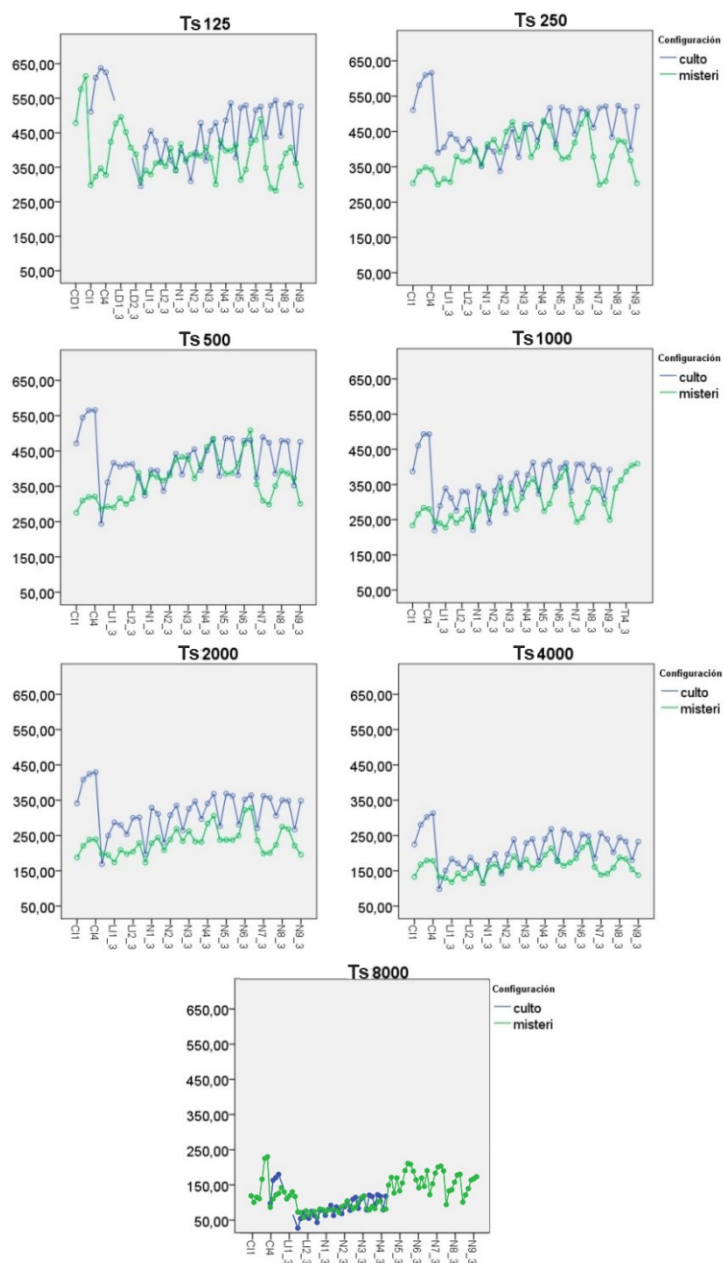
Desde el punto de vista de la percepción, las diferencias superan 1 JND en muchos más casos que cuando se toman valores globales, no obstante, no alcanzan los 2 JND para las frecuencias representativas y nunca ocurre en las tres zonas simultáneamente, sino que va variando la zona en función de la frecuencia. Así, las diferencias son perceptibles en las capillas para frecuencias bajas, medias y medias-altas.

Tabla IV.2.3.9. Comparación de los valores medios de C80 medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
C80_125	capillas	-5,600	-9,600	0,955	0,722	4,000	0,001	2,67
	nave	-6,300	-5,669	0,368	0,368	-0,631	0,119	0,42
	transepto	-2,650	-5,429	0,780	0,551	2,779	0,002	1,85
C80_250	capillas	-9,063	-10,893	0,900	0,680	1,830	0,178	1,22
	nave	-7,461	-7,831	0,346	0,346	0,370	0,735	0,25
	transepto	-3,933	-4,675	0,734	0,519	0,742	0,361	0,49
C80_500	capillas	-12,913	-11,336	1,137	0,860	-1,577	0,346	1,05
	nave	-10,076	-8,943	0,438	0,438	-1,133	0,164	0,76
	transepto	-4,058	-4,104	0,929	0,657	0,046	0,664	0,03
C80_1000	capillas	-12,075	-9,871	1,065	0,805	-2,204	0,083	1,47
	nave	-8,546	-5,628	0,410	0,410	-2,919	0,000	1,95
	transepto	-2,275	-3,213	0,869	0,615	0,938	0,129	0,63
C80_2000	capillas	-10,875	-8,836	1,070	0,809	-2,039	0,123	1,36
	nave	-6,394	-3,322	0,412	0,412	-3,072	0,000	2,05
	transepto	-2,392	-2,596	0,874	0,618	0,204	0,413	0,14
C80_4000	capillas	-8,088	-7,257	1,000	0,756	-0,830	0,454	0,55
	nave	-3,887	-2,131	0,385	0,385	-1,756	0,005	1,17
	transepto	-0,333	-1,029	0,816	0,577	0,696	0,219	0,46
C80_8000	capillas	-4,425	-4,850	0,809	0,612	0,425	0,922	0,28
	nave	0,511	0,304	0,311	0,311	0,207	0,527	0,14
	transepto	3,675	0,717	0,661	0,467	2,958	<0,001	1,97

La figura IV.2.3.6 recoge la representación gráfica por frecuencias de las medidas del parámetro Ts tomadas en la Basílica con las dos configuraciones espaciales en todos los puntos. De nuevo, se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados pertenecientes a las capillas, y un segundo grupo correspondiente al transepto que se aproxima a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico.

El comportamiento es muy similar para ambas configuraciones, con valores generalmente inferiores en el caso del Misteri pero que se solapan en algunos puntos.



Los valores registrados en las capillas son superiores en todos los casos. Los resultados registrados en la nave y el transepto aportan varios datos interesantes. En primer lugar se observa como el valor de Ts medido aumenta a medida que las posiciones de registro se alejan de la fuente a todas las frecuencias. Del mismo modo se aprecia una diferencia entre los tres puntos medidos en cada fila de bancos, obteniendo valores considerablemente inferiores en las medidas en las posiciones del centro de la nave respecto a los laterales. Esto se aprecia en todas las frecuencias y de manera más acusada en la configuración propia de la celebración del culto.

Tabla IV.2.3.10. Comparación de los valores medios de Ts medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
Ts125	447,474	472,849	10,798	8,225	-25,375	0,063	0,07
Ts250	492,836	474,761	9,748	7,425	18,076	0,142	0,04
Ts500	501,522	444,897	10,724	8,169	56,625	0,000	0,13
Ts1000	431,173	367,039	10,142	7,725	64,133	0,000	0,17
Ts2000	342,664	287,092	9,070	6,909	55,572	0,000	0,19
Ts4000	230,639	215,252	7,216	5,496	15,386	0,092	0,08
Ts8000	123,380	145,340	4,477	3,410	-21,960	0,000	0,21

La tabla IV.2.3.10 recoge las diferencias en cuanto a valores medios de sala del parámetro Ts. Las diferencias en valor real son pequeñas, alcanzando los valores máximos en torno a 60 ms en frecuencias medias.

Existe diferencia estadísticamente significativa a frecuencias medias y altas. En términos de percepción, no existe diferencia entre una configuración y otra ya que la mayor diferencia detectada se produce a 8000 Hz con un valor de 0,21 JND.

Si se comparan los resultados por zonas, como muestra la tabla IV.2.3.11, se obtienen las mismas conclusiones. Las diferencias más altas se encuentran a 1000 Hz con valores en torno a los 80-90 ms. Por lo general el transepto es la zona en la que menores diferencias se aprecian, a excepción de las frecuencias extremas.

Tabla IV.2.3.11. Comparación de los valores medios de Ts medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
Ts125	capillas	496,125	548,857	24,046	18,177	-52,732	0,082	0,13
	nave	487,296	435,648	9,255	9,255	51,648	0,000	0,12
	transepto	359,000	434,042	19,634	13,883	-75,042	0,002	0,25
Ts250	capillas	575,750	546,643	21,709	16,410	29,107	0,286	0,06
	nave	504,426	466,889	8,356	8,356	37,537	0,002	0,09
	transepto	398,333	410,750	17,725	12,534	-12,417	0,568	0,04
Ts500	capillas	580,750	509,500	23,882	18,053	71,250	0,018	0,14
	nave	529,648	458,981	9,192	9,192	70,667	0,000	0,16
	transepto	394,167	366,208	19,500	13,788	27,958	0,243	0,08
Ts1000	capillas	523,500	435,429	22,586	17,074	88,071	0,002	0,20
	nave	455,685	363,981	8,693	8,693	91,704	0,000	0,24
	transepto	314,333	301,708	18,442	13,040	12,625	0,577	0,05
Ts2000	capillas	417,750	357,071	20,199	15,269	60,679	0,018	0,17
	nave	348,074	264,370	7,774	7,774	83,704	0,000	0,28
	transepto	262,167	239,833	16,492	11,662	22,333	0,271	0,10
Ts4000	capillas	293,000	276,429	16,069	12,147	16,571	0,412	0,07
	nave	234,333	195,704	6,185	6,185	38,630	0,000	0,19
	transepto	164,583	173,625	13,120	9,277	-9,042	0,574	0,06
Ts8000	capillas	176,250	194,500	9,971	7,537	-18,250	0,146	0,12
	nave	118,222	123,519	3,838	3,838	-5,296	0,331	0,05
	transepto	75,667	118,000	8,141	5,757	-42,333	0,000	0,66

Existe diferencia estadísticamente significativa en la zona de la nave a todas las frecuencias excepto 8000 Hz, en las capillas a frecuencias medias y en el transepto a frecuencias extremas.

En términos de percepción no existen diferencias entre una configuración y otra, siendo el valor máximo 0,28 JND para la nave a 2000 Hz.

Los gráficos incluidos en la figura IV.2.3.7 muestran los resultados del parámetro G en cada una de las posiciones de medida para las dos configuraciones espaciales. Los resultados para la configuración de culto presentan mayor variabilidad.

Se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas, un segundo grupo correspondiente al transepto que se aproxima a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico. El comportamiento es similar para ambas configuraciones a frecuencias altas y bajas pero difiere en mayor medida a frecuencias medias.

Se observa como el valor de G medido aumenta a medida que las posiciones de registro se alejan de la fuente a frecuencias bajas en los dos casos, a 1000 Hz esta tendencia se invierte para la configuración del Misteri manteniéndose en el caso del culto. A frecuencias altas el valor pasa a disminuir al aumentar la distancia fuente-receptor.

Por otra parte, se aprecia una diferencia entre los tres puntos medidos en cada fila de bancos. Esto ocurre especialmente en el caso del culto en el que se han obtenido valores considerablemente inferiores en las medidas registradas en las posiciones del centro de la nave respecto a los laterales. En la configuración del Misteri, ocurre lo mismo pero de manera mucho más atenuada.

Tabla IV.2.3.12. Comparación de los valores medios de G medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
G_125	18,202	20,689	0,936	0,713	-2,487	0,036	2,49
G_250	18,600	19,940	0,927	0,706	-1,340	0,252	1,34
G_500	19,291	16,788	0,964	0,734	2,503	0,040	2,50
G_1000	15,737	15,380	1,026	0,781	0,357	0,782	0,36
G_2000	15,171	16,122	1,166	0,888	-0,951	0,517	0,95
G_4000	13,865	16,978	1,208	0,920	-3,113	0,042	3,11
G_8000	10,756	14,620	1,199	0,913	-3,865	0,011	3,86

La tabla IV.2.3.12 recoge las diferencias en cuanto a valores medios de sala del parámetro G. Las mayores diferencias se encuentran a frecuencias extremas, con valores de 2, 5 y 3,8 dB. Cabe destacar que a las frecuencias más

representativas, se observa una variación importante de 2, 5 dB a 500 Hz pero a 1000 Hz los valores únicamente difieren 0,3 dB.

Existe diferencia estadísticamente significativa a la frecuencia de 8000 Hz, y a las de 500 y 4000 Hz pero con muy poca significación.

En términos de percepción, no existe diferencia entre una configuración y otra a 1000 y 2000 Hz pero sí en el resto de los casos, ascendiendo a 2,5 JND a 500 Hz y superando los 3 JND a frecuencias altas.

Tabla IV.2.3.13. Comparación de los valores medios de G medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
G_125	capillas	22,438	29,014	2,084	1,575	-6,577	0,013	6,58
	nave	16,169	15,531	0,802	0,802	0,637	0,575	0,64
	transepto	16,000	17,521	1,702	1,203	-1,521	0,467	1,52
G_250	capillas	24,425	29,879	2,064	1,560	-5,454	0,037	5,45
	nave	15,867	15,350	0,794	0,794	0,517	0,646	0,52
	transepto	15,508	14,592	1,685	1,192	0,917	0,658	0,92
G_500	capillas	30,825	26,043	2,146	1,622	4,782	0,077	4,78
	nave	15,489	12,559	0,826	0,826	2,930	0,013	2,93
	transepto	11,558	11,763	1,752	1,239	-0,204	0,924	0,20
G_1000	capillas	26,913	28,143	2,285	1,727	-1,230	0,668	1,23
	nave	11,141	5,930	0,879	0,879	5,211	<0,001	5,21
	transepto	9,158	12,067	1,866	1,319	-2,908	0,205	2,91
G_2000	capillas	25,775	32,614	2,597	1,963	-6,839	0,037	6,84
	nave	9,239	4,578	1,000	1,000	4,661	0,001	4,66
	transepto	10,500	11,175	2,121	1,499	-0,675	0,795	0,68
G_4000	capillas	26,525	36,529	2,691	2,034	-10,004	0,003	10,00
	nave	6,194	3,683	1,036	1,036	2,511	0,088	2,51
	transepto	8,875	10,721	2,197	1,553	-1,846	0,494	1,85
G_8000	capillas	23,725	30,993	2,670	2,018	-7,268	0,031	7,27
	nave	2,550	2,006	1,028	1,028	0,544	0,708	0,54
	transepto	5,992	10,863	2,180	1,541	-4,871	0,070	4,87

Si se comparan los resultados por zonas, como muestra la tabla IV.2.3.13, la influencia de los cambios espaciales es mayor. Al contrario de lo que ocurría con los valores medios globales, se aprecian diferencias importantes también a

1000 Hz, que alcanzan los 5 dB en la nave. Las capillas presentan las mayores variaciones a todas las frecuencias, excepto 1000 Hz, con valores entre 4,8 y 10 dB. Valores muy superiores a los máximos obtenidos al considerar la sala completa. El transepto es la zona que menos varía a frecuencias no extremas.

Existe diferencia estadísticamente significativa en las capillas a frecuencias bajas y altas, en la nave a frecuencias medias y medias-altas, y en el transepto a 8000 Hz.

A nivel de percepción existen diferencias importantes. En el caso de las capillas se perciben diferencias a todas las frecuencias, la menor de ellas corresponde a 1,23 JND a la frecuencia de 1000 Hz y la mayor alcanza los 10 JND a 4000 Hz, en el resto de frecuencias se encuentran entre 4 y 7 JND. En la nave no existe diferencia a frecuencias bajas y las diferencias son algo menores a frecuencias medias y medias-altas situándose en torno a los 3-5 JND. Por último, en el transepto no existen diferencias perceptibles a frecuencias medias-bajas pero sí a bajas y altas, siendo la más relevante la de casi 3 JND a 1000 Hz.

IV.2.3.1.3 Variaciones en los parámetros de inteligibilidad

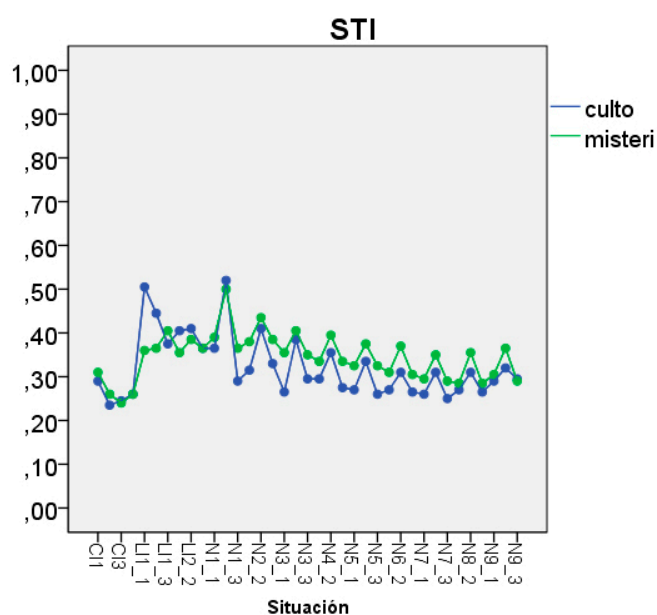


Figura IV.2.3.8. Valores de STI medidos por puntos para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

La figura IV.2.3.8 muestra los valores de STI medidos en cada una de las posiciones de registro para las dos configuraciones. En ambos casos se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas, un segundo grupo correspondiente al transepto que se aproxima a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico. Se observa como la inteligibilidad disminuye a medida que aumenta la distancia del receptor con la fuente y presenta los peores valores en las capillas.

En los puntos pertenecientes a la nave se observan mejores resultados en las posiciones centrales que en las laterales tanto en el caso del culto como en el Misteri. Las dos configuraciones siguen la misma tendencia obteniendo valores algo mejores en el caso del Misteri, debido a la menor reverberación.

Tabla IV.2.3.14. Comparación de los valores medios de STI medidos para cada uno de los usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Dif. Uso
	culto	misteri	
STI	0,328	0,333	-0,005

La tabla IV.2.3.14 incluye los valores medios de STI para los dos usos y la diferencia entre ellos. Al comparar los valores medios de sala, las diferencias que se observaban en el estudio por puntos pasan a ser inapreciables.

Tabla IV.2.3.15. Comparación de los valores medios de STI por zonas para cada uno de los usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Dif. Uso
	culto	misteri	
STI capillas	0,258	0,266	-0,008
STI nave	0,310	0,350	-0,040
STI transepto	0,418	0,372	0,046

La tabla IV.2.3.15 incluye los valores medios de STI para los dos usos por zonas y la diferencia entre ellos. Al comparar los valores medios por zonas las diferencias son algo mayores, aunque no relevantes, para las zonas de la nave y el transepto, no obstante en el caso de las capillas continúan siendo prácticamente inexistentes.

IV.2.3.1.4 Variaciones en los parámetros de espacialidad

Los gráficos incluidos en la figura IV.2.3.9 muestran los resultados del parámetro IACCA en cada una de las posiciones de medida para las dos configuraciones espaciales. A medida que aumenta la frecuencia los resultados presentan mayor variabilidad entre puntos.

El comportamiento es similar para ambas configuraciones a frecuencias bajas y medias, solapándose los valores obtenidos, pero difiere en mayor medida a frecuencias altas.

A frecuencias bajas, se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas y el transepto y los de la nave, representados en la derecha del gráfico.

Se observa como el valor de IACCA medido no varía con la distancia a partir de un cierto alejamiento aunque sí se obtienen valores superiores en los puntos más próximos pertenecientes a las primeras filas de bancos.

Por otra parte, se aprecia una diferencia entre los tres puntos medidos en cada fila de bancos, obteniendo valores considerablemente superiores en las medidas registradas en las posiciones del centro de la nave respecto a los laterales.

La tabla IV.2.3.16 recoge las diferencias en cuanto a valores medios de sala del parámetro IACCA. Las diferencias son mínimas, las mayores se dan a frecuencias altas pero no superan el valor de 0,072.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción, no existe diferencia entre una configuración y otra.

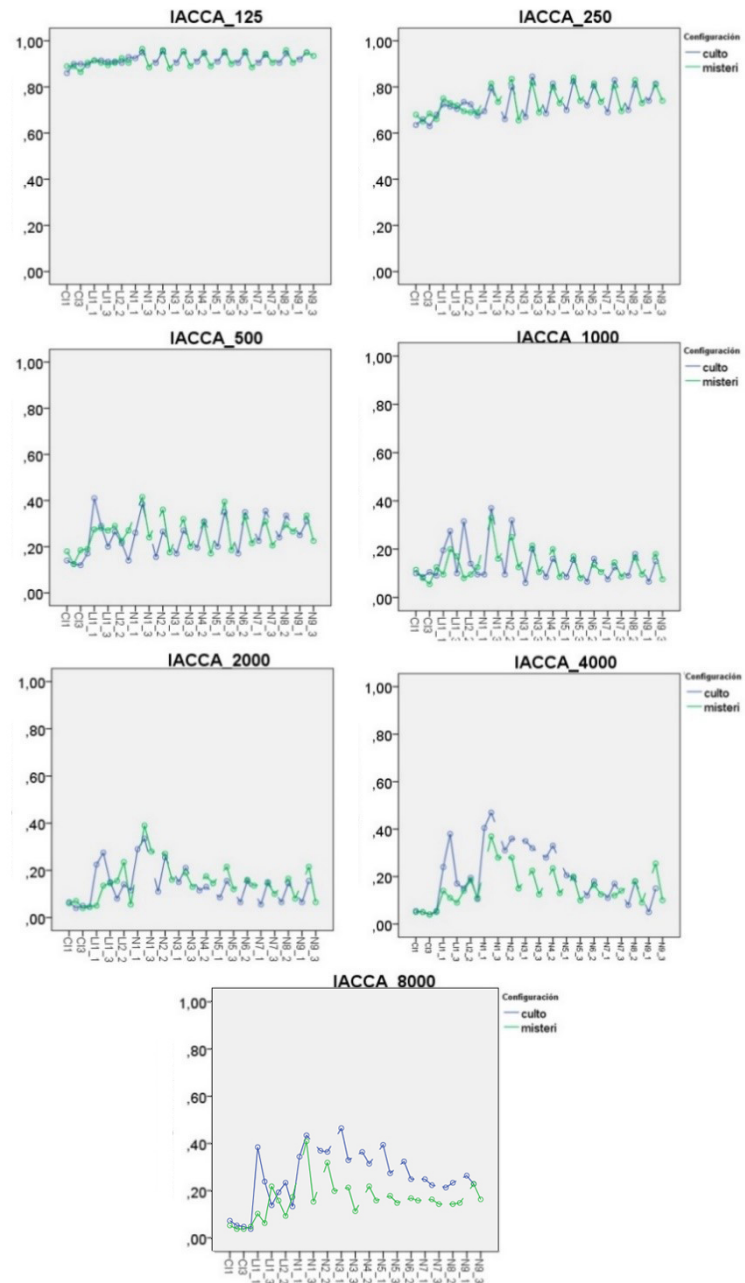


Figura IV.2.3.9. Valores de IACCA medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.16. Comparación de los valores medios de IACCA medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
IACCA_125	0,911	0,907	0,004	0,004	0,004	0,521	0,05
IACCA_250	0,707	0,716	0,009	0,009	-0,010	0,469	0,12
IACCA_500	0,219	0,238	0,015	0,015	-0,018	0,407	0,23
IACCA_1000	0,141	0,124	0,015	0,015	0,017	0,423	0,21
IACCA_2000	0,121	0,119	0,018	0,018	0,002	0,935	0,03
IACCA_4000	0,165	0,119	0,020	0,020	0,045	0,119	0,56
IACCA_8000	0,197	0,125	0,018	0,018	0,072	0,005	0,90

Si se comparan los resultados por zonas, como muestra la tabla IV.2.3.17, los resultados son equivalentes. Las mayores diferencias se encuentran a frecuencias altas para la nave y el transepto con valores algo más elevados que los generales, 0,122 para el caso de la nave y 0,085 en el transepto.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción, existen pequeñas diferencias en la nave y el transepto a la frecuencia de 8000 Hz, que alcanzan los 1,5 JND en el caso de la nave y 1,06 en el transepto, pero que dada la escasa relevancia de esa banda de frecuencia y los valores sobrepasados pueden considerarse despreciables.

Se puede concluir por tanto, que los cambios espaciales no influyen en los valores del parámetro binaural IACCA.

Los gráficos incluidos en la figura IV.2.3.10 muestran los resultados del parámetro LF en cada una de las posiciones de medida para las dos configuraciones espaciales. La variabilidad en este parámetro es similar en todas las frecuencias.

Se aprecia una diferencia entre el comportamiento de los primeros puntos representados que corresponden con las capillas, un segundo grupo correspondiente al transepto que se aproxima a la tendencia de los puntos de la nave, representados en la última parte del gráfico. Estas diferencias son más evidentes a frecuencias bajas

Tabla IV.2.3.17. Comparación de los valores medios de IACCA medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
IACCA 125	capillas	0,889	0,888	0,009	0,009	0,001	0,920	0,02
	nave	0,930	0,926	0,004	0,004	0,004	0,508	0,05
	transepto	0,914	0,908	0,007	0,007	0,006	0,566	0,07
IACCA 250	capillas	0,651	0,669	0,020	0,020	-0,018	0,546	0,22
	nave	0,756	0,768	0,010	0,010	-0,012	0,372	0,15
	transepto	0,713	0,712	0,017	0,017	0,001	0,972	0,01
IACCA 500	capillas	0,139	0,170	0,034	0,034	-0,031	0,514	0,39
	nave	0,266	0,275	0,016	0,016	-0,008	0,712	0,10
	transepto	0,253	0,268	0,028	0,028	-0,015	0,701	0,19
IACCA 1000	capillas	0,095	0,094	0,033	0,033	0,001	0,978	0,02
	nave	0,141	0,150	0,015	0,015	-0,009	0,665	0,12
	transepto	0,187	0,128	0,027	0,027	0,059	0,119	0,74
IACCA 2000	capillas	0,050	0,054	0,039	0,039	-0,004	0,946	0,05
	nave	0,149	0,174	0,018	0,018	-0,025	0,340	0,31
	transepto	0,164	0,129	0,032	0,032	0,035	0,440	0,44
IACCA 4000	capillas	0,050	0,048	0,044	0,044	0,002	0,968	0,03
	nave	0,237	0,182	0,021	0,021	0,055	0,064	0,69
	transepto	0,207	0,129	0,036	0,036	0,078	0,132	0,97
IACCA 8000	capillas	0,055	0,046	0,039	0,039	0,009	0,874	0,11
	nave	0,314	0,192	0,018	0,018	0,122	<0,001	1,53
	transepto	0,222	0,137	0,032	0,032	0,085	0,062	1,06

El comportamiento es muy similar para ambas configuraciones, solapándose los valores en la mayoría de casos.

Los resultados registrados en la nave muestran una diferencia entre los puntos de la misma fila de bancos, obteniendo valores inferiores en las posiciones medidas en el centro de la nave respecto a los laterales. Destacan tres puntos en los que se producen efectos que elevan el valor del parámetro de manera considerable. Esto ocurre en los puntos N32 y N 81 de la nave para el caso del culto y en el punto L12 del transepto para el caso del Misteri. En el último caso, el resultado puede ser debido a la proximidad con la estructura del cadafal, pero no se ha encontrado ningún elemento concreto que explique los resultados en los otros dos puntos.

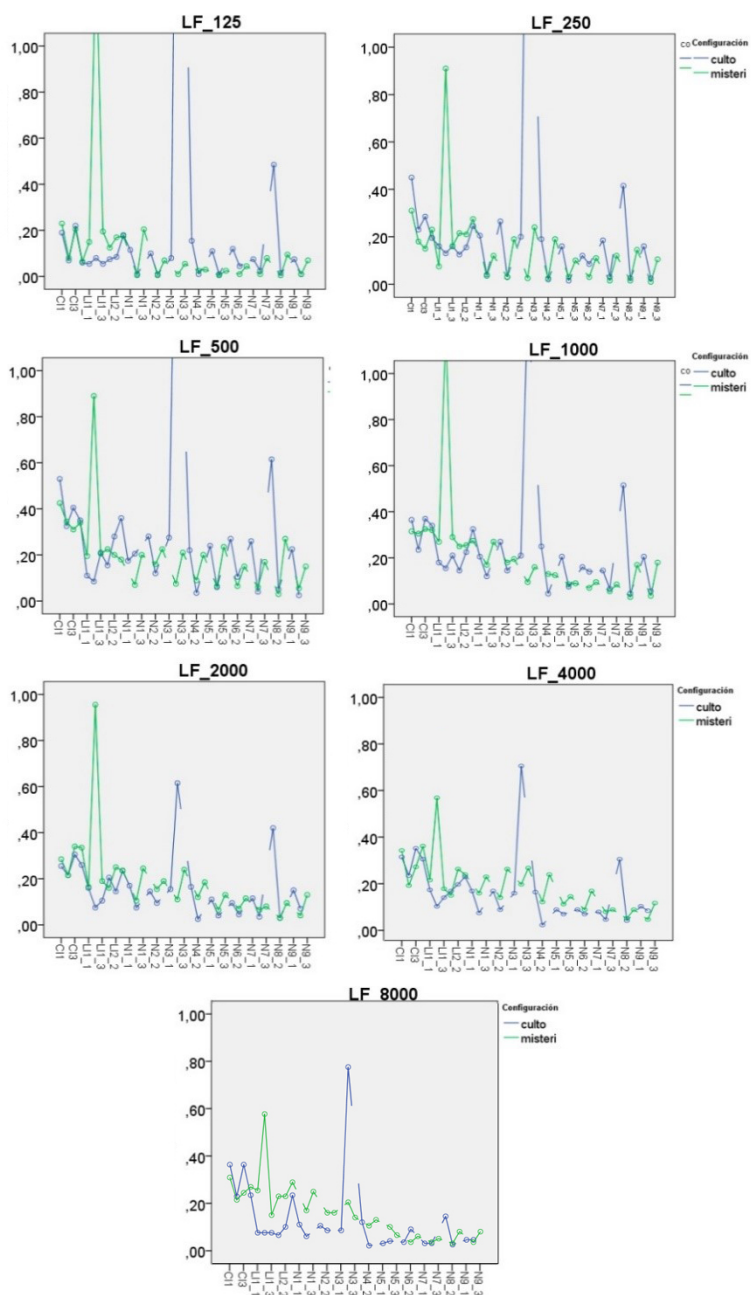


Figura IV.2.3.10. Valores de LF medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.

Tabla IV.2.3.18. Comparación de los valores medios de LF medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND
	culto	misteri	culto	misteri			
LF_125	0,160	0,187	0,105	0,105	-0,027	0,857	0,54
LF_250	0,233	0,203	0,073	0,073	0,029	0,777	0,59
LF_500	0,296	0,270	0,062	0,062	0,026	0,766	0,53
LF_1000	0,255	0,287	0,047	0,047	-0,032	0,634	0,63
LF_2000	0,185	0,247	0,032	0,032	-0,062	0,170	1,24
LF_4000	0,212	0,246	0,026	0,026	-0,034	0,367	0,67
LF_8000	0,169	0,218	0,026	0,026	-0,049	0,194	0,98

La tabla IV.2.3.18 recoge las diferencias en cuanto a valores medios de sala del parámetro LF. Las diferencias son mínimas, la mayor se da a 2000 Hz pero no superan el valor de 0,062.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción, únicamente existe diferencia a 200 Hz, superando ligeramente 1 JND.

Si se comparan los resultados por zonas, como muestra la tabla IV.2.3.19, los resultados cambian. Las mayores diferencias se encuentran a frecuencias bajas y medias para la nave y el transepto, alcanzando el valor máximo de 0,285 en el transepto para la frecuencia de 125 Hz.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción, puede considerarse que no existen diferencias para el caso de las capillas, dado que únicamente se supera ligeramente el valor d1 JND a 250 Hz. En la nave existen diferencias de 2-3 JND a frecuencias medias y 3-4 JND a bajas. Por último, el transepto presenta diferencias superiores a los 2 JND a todas las frecuencias que alcanzan los 4 a 1000 Hz y los 5 a 125 Hz.

Tabla IV.2.3.19. Comparación de los valores medios de LF medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente	Media		Error estándar		Dif. de medias	Sig.	Dif. JND	
	culto	misteri	culto	misteri				
LF_125	capillas	0,135	0,145	0,229	0,229	-0,010	0,975	0,20
	nave	0,256	0,042	0,108	0,108	0,214	0,164	4,28
	transepto	0,088	0,373	0,187	0,187	-0,285	0,284	5,70
LF_250	capillas	0,290	0,218	0,160	0,160	0,072	0,750	1,45
	nave	0,246	0,085	0,076	0,076	0,161	0,135	3,22
	transepto	0,163	0,308	0,131	0,131	-0,145	0,435	2,90
LF_500	capillas	0,403	0,355	0,136	0,136	0,047	0,806	0,95
	nave	0,285	0,138	0,064	0,064	0,148	0,108	2,95
	transepto	0,200	0,316	0,111	0,111	-0,116	0,463	2,32
LF_1000	capillas	0,328	0,316	0,102	0,102	0,011	0,938	0,22
	nave	0,232	0,123	0,048	0,048	0,108	0,114	2,17
	transepto	0,207	0,421	0,083	0,083	-0,214	0,072	4,28
LF_2000	capillas	0,259	0,294	0,069	0,069	-0,035	0,721	0,70
	nave	0,142	0,121	0,033	0,033	0,021	0,643	0,43
	transepto	0,154	0,326	0,056	0,056	-0,172	0,034	3,43
LF_4000	capillas	0,316	0,306	0,057	0,057	0,010	0,902	0,20
	nave	0,145	0,149	0,027	0,027	-0,004	0,908	0,09
	transepto	0,175	0,282	0,047	0,047	-0,107	0,110	2,13
LF_8000	capillas	0,299	0,260	0,058	0,058	0,039	0,636	0,77
	nave	0,104	0,105	0,027	0,027	-0,001	0,989	0,01
	transepto	0,104	0,289	0,047	0,047	-0,185	0,007	3,70

IV.2.3.2. Evaluación de la calidad sintética de la Basílica para la música y el habla

A partir de las medidas realizadas y utilizando el modelo presentado en Girón et al. (2015) y Álvarez-Morales et al. (2016), se han calculado los índices parciales para cada parámetro en todas las zonas y los índices sintéticos de calidad para el habla y la música. Las tablas IV.2.3.20 a IV.2.3.23 muestran los resultados.

Tabla IV.2.3.20. Índices sintéticos parciales para cada parámetro y zona para la configuración de culto

Zona	İEDT	İEDT	İBR	İBR	İJLF	İJLF	İİACC	İİACC	İİG	İİG	İC80	İC80	İC50	İC50
	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla
Cap.	0,0	0,0	1,0	0,997	1,0	1,0	0,344	0,344	1,0	1,0	0,004	0,004	0,0	0,0
Nave	0,0	0,0	1,0	0,989	1,0	1,0	0,675	0,675	1,0	1,0	0,349	0,349	0,312	0,312
Tran.	0,0	0,0	1,0	0,987	0,822	1,0	0,732	0,732	1,0	1,0	0,866	0,866	0,849	0,849
Med	0,0	0,0	1,0	0,991	1,0	1,0	0,584	0,584	1,0	1,0	0,406	0,406	0,324	0,324

Tabla IV.2.3.21. Índices sintéticos por zonas y medios para la configuración de culto

Zona	SI _{música}	SI _{habla}
Capillas	0,485	0,484
Nave	0,587	0,579
Transepto	0,670	0,691
Medio	0,590	0,572

Tabla IV.2.3.22. Índices sintéticos parciales para cada parámetro y zona para la configuración del Misteri

Zona	İEDT	İEDT	İBR	İBR	İJLF	İJLF	İİACC	İİACC	İİG	İİG	İC80	İC80	İC50	İC50
	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla	música	habla
Cap.	0,0	0,0	1,0	0,966	1,0	1,0	0,385	0,385	1,0	1,0	0,189	0,189	0,006	0,006
Nave	0,0	0,0	1,0	0,961	0,486	0,486	0,727	0,727	1,0	1,0	0,575	0,575	0,578	0,578
Tran.	0,0	0,0	1,0	0,952	1,0	1,0	0,636	0,636	1,0	1,0	0,828	0,828	0,725	0,725
Med	0,0	0,0	1,0	0,960	1,0	1,0	0,583	0,583	1,0	1,0	0,531	0,531	0,436	0,436

Tabla IV.2.3.23. Índices sintéticos por zonas y medios para la configuración del Misteri.

Zona	IS _{música}	IS _{habla}
Capillas	0,526	0,485
Nave	0,560	0,580
Transepto	0,679	0,651
Medio	0,614	0,590

Aunque como ya se ha comentado anteriormente, es necesaria una investigación más profunda en cuanto a la valoración subjetiva, estos índices globales oscilan los valores de 1 y 0 a condiciones excelentes y pobres respectivamente. Se observa que los resultados son muy similares en las dos configuraciones tanto en el caso de la música como del habla.

En la tabla IV.2.3.24 se recogen los valores medios de los índices sintéticos de diferentes iglesias estudiadas por otros autores con un volumen similar al de la Basílica de Santa María. Si se comparan con los obtenidos se observa que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los valores habituales en este tipo de espacios.

Tabla IV.2.3.24. Índices sintéticos de diferentes iglesias.

Iglesia	V(m ³)	IS _{música}	IS _{habla}
Catedral de Sevilla ¹	215000	0,93	0,67
Catedral de Málaga ¹	118500	0,70	0,66
Catedral de Granada ¹	158600	0,61	0,65
Catedral de Jaén ¹	85100	0,65	0,65
Duomo de Orvieto ²	78000	0,58	-
St Andrea en Mantova	78000	0,57	-
Catedral de Cádiz ¹	70000	0,62	0,59
Basílica de San Lorenzo en Florencia ²	39000	0,59	-
Iglesia de Il Gesú en Roma ²	39000	0,61	-
Catedral de Assunta en Lucena ²	33100	0,59	-
Basílica de Santa María en Elche	25000	0,59	0,57
Basílica de Santa María en Elche (Misteri)	22600	0,61	0,59
Catedral de Córdoba ¹	22114	0,92	0,67
Santa Maria Assunta en Riola di Vergato ²	6300	0,62	-
Sacra di San Michele en Avigliana ²	7000	0,77	-
Catedral de San Cataldo en Taranto ³	9000	-	0,70

¹ Álvarez-Morales et al., 2016

² Cirillo y Martellotta, 2006

³ Berardi, 2012

IV.2.3.3. Influencia de la audiencia

Los diferentes usos que tienen lugar en el interior de la Basílica no sólo llevan asociados cambios en la configuración del espacio, sino también en la cantidad de público y su distribución. Así mientras que para la celebración del culto, la audiencia se concentra en los bancos situados en la nave y el transepto, durante la celebración de la Fiestas, prácticamente la totalidad de la planta baja se encuentra llena de gente, y lo mismo ocurre con los balcones de la planta superior.

La figura IV.2.3.11 muestra las zonas ocupadas por el público para cada uno de los dos usos principales, y la tabla IV.2.3.20 recoge la superficie ocupada por la audiencia y su relación con el volumen de la sala en cada caso.

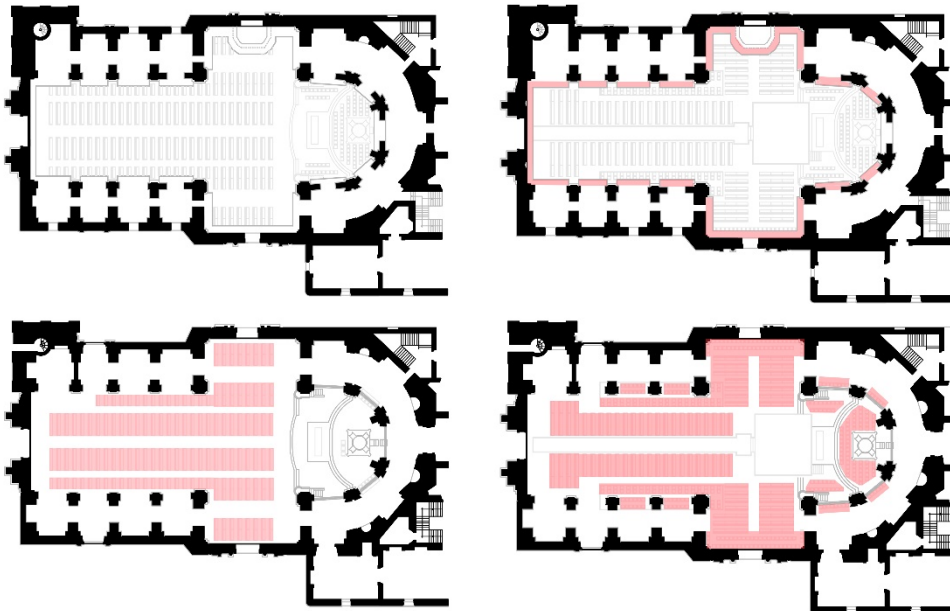


Figura IV.2.3.11. Distribución de la audiencia en el interior de la Basílica para los dos usos principales: culto a la izquierda y representación del Misteri a la derecha.

Este hecho hace que la influencia que tiene la audiencia en el comportamiento acústico de la Basílica varíe en función del uso. Para determinar en qué medida lo hace, a partir de las simulaciones validadas en los capítulos anteriores, se ha realizado un estudio comparativo de los resultados de cada parámetro y frecuencia, considerando los 37 puntos de la planta baja en los que se han tomado medidas.

Tabla IV.2.3.25. Área de audiencia y relación con el volumen de la sala para los dos usos principales.

Culto	Misteri
Área audiencia: 342 m ² Vol/área audiencia: 73,10 m ³ /m ²	Área audiencia: 633 m ² Vol/área audiencia: 35,70 m ³ /m ²

IV.2.3.3.1 Influencia del público en los parámetros de reverberación

La absorción acústica del público es mucho mayor a la de los bancos de madera y demás materiales presentes en la Basílica por lo que su presencia interviene directamente en el comportamiento reverberante del espacio.

A título ilustrativo, las figuras IV.2.3.12 y IV.2.3.13 muestran los resultados por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

Como es habitual, la influencia de la presencia de público en la sala provoca una bajada del tiempo de reverberación a todas las frecuencias en los dos casos. Como cabía esperar, el efecto es mayor en el caso del Misteri ya que la superficie ocupada es superior. La influencia no es la misma a todas las frecuencias, observándose mayores variaciones a 1000 y 2000 Hz.

Por otra parte, se observa que los valores de RT obtenidos para la configuración de culto llena son similares a los de la Basílica para el Misteri vacía.

La tabla IV.2.3.21 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias máximas se producen a 1000 Hz, con valores de 0,77 segundos para el culto y 1,11 segundos en el Misteri. En el resto de frecuencias las diferencias para la configuración del Misteri son siempre superiores con valores entre 0,4 y 0,9 segundos frente a las variaciones en el rango comprendido entre 0,2 y 0,6 que tienen lugar en el culto.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos.

En términos de percepción resulta llamativo que no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para el culto a las frecuencias de 250 y 500 Hz. Los máximos se encuentran de nuevo a 1000 y 2000 Hz con valores de 2,6 y 2,3 JND respectivamente.

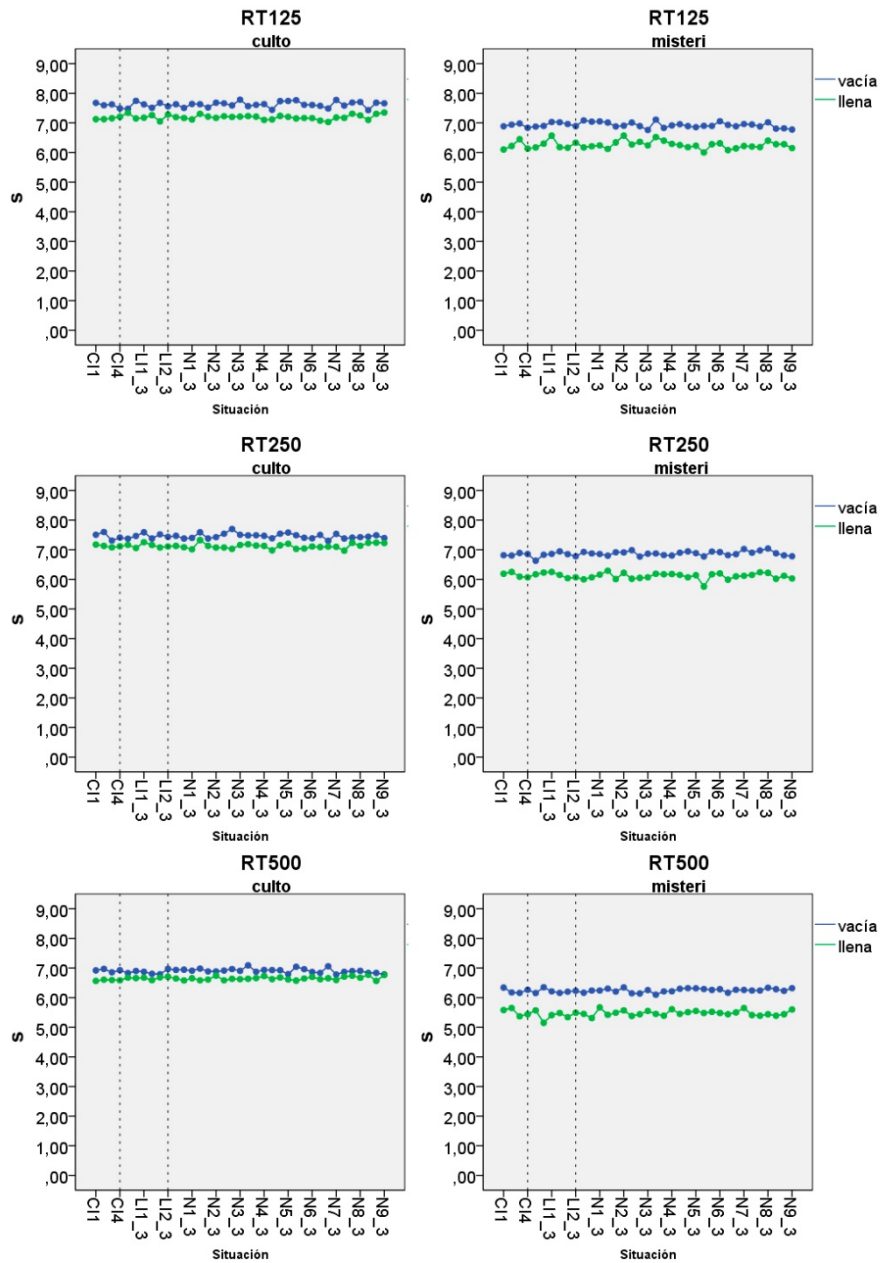


Figura IV.2.3.12. Valores de RT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

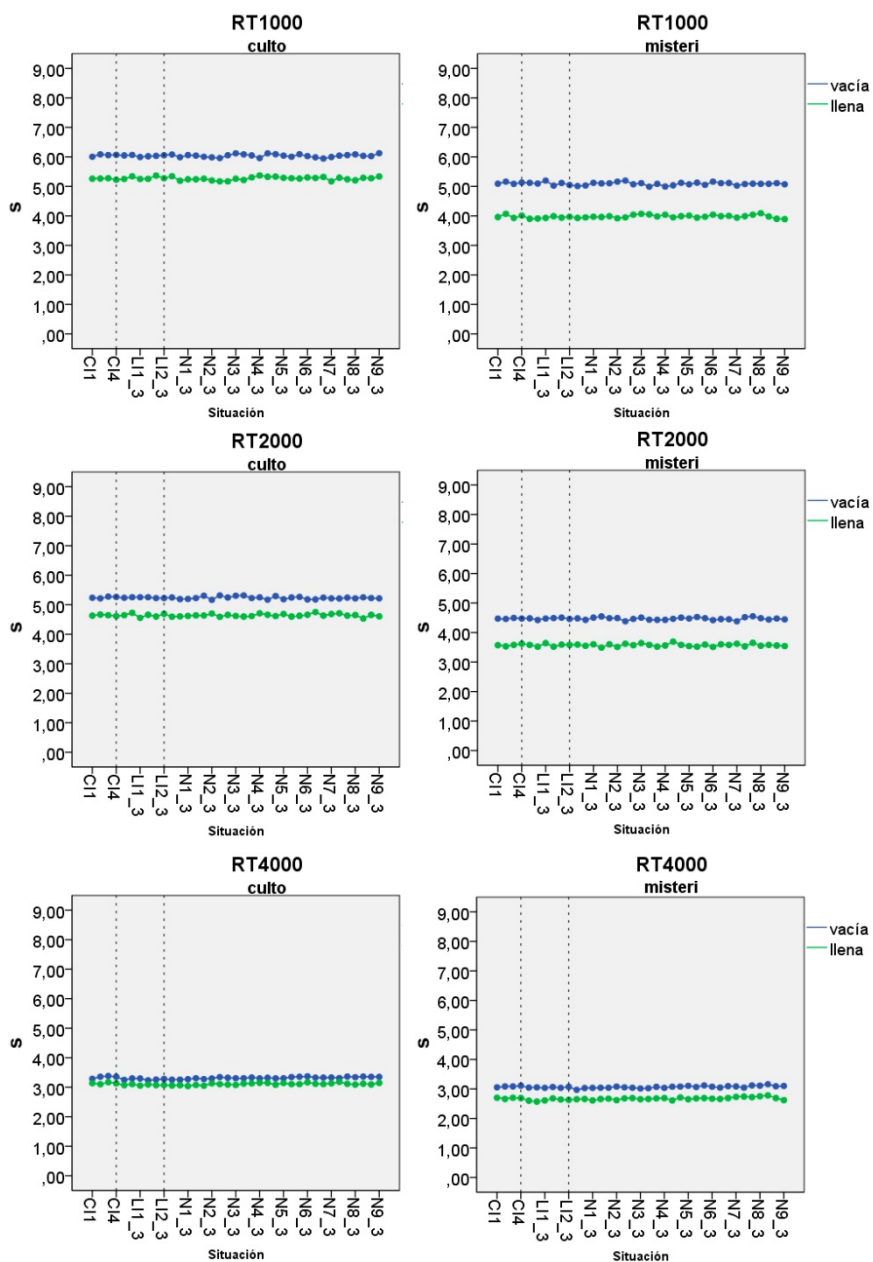


Figura IV.2.3.13. Valores de RT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.26. Comparación de los valores medios de RT simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
RT125	culto	vacía	7,619	0,015	0,430	<0,001	1,128
		llena	7,189	0,015			
	misteri	vacía	6,929	0,015	0,671	<0,001	1,938
		llena	6,257	0,021			
RT250	culto	vacía	7,462	0,014	0,336	<0,001	0,900
		llena	7,126	0,014			
	misteri	vacía	6,868	0,014	0,748	<0,001	2,179
		llena	6,119	0,020			
RT500	culto	vacía	6,902	0,011	0,254	<0,001	0,737
		llena	6,648	0,011			
	misteri	vacía	6,241	0,011	0,769	<0,001	2,465
		llena	5,472	0,016			
RT1000	culto	vacía	6,041	0,008	0,773	<0,001	2,558
		llena	5,268	0,008			
	misteri	vacía	5,091	0,008	1,113	<0,001	4,372
		llena	3,978	0,011			
RT2000	culto	vacía	5,236	0,006	0,596	<0,001	2,275
		llena	4,641	0,006			
	misteri	vacía	4,470	0,006	0,897	<0,001	4,013
		llena	3,573	0,009			
RT4000	culto	vacía	3,314	0,005	0,207	<0,001	1,249
		llena	3,107	0,005			
	misteri	vacía	3,066	0,005	0,396	<0,001	2,584
		llena	2,670	0,007			

Para la configuración propia de la representación, las diferencias son perceptibles en todos los casos superando los 4 JND en los más notorios.

Por último se ha analizado si la influencia del público es la misma en todas las zonas. La figura IV.2.3.14 muestra los valores medios por frecuencias para cada zona obtenidos en las simulaciones. Dada la homogeneidad del parámetro, los resultados prácticamente no varían de una zona a otra. A frecuencias altas los valores tienden a igualarse para los cuatro casos en todas las zonas, llegando a solaparse la configuración para el culto llena con la de Misteri vacía.

Este efecto a frecuencias altas se observa en estudios similares como es el caso de la Basílica de I I G esú (Martellota, 2 014), de dimensiones y geometría

similares. En ambas, las principales diferencias entre llena y vacía se concentran en la banda de 1000 Hz.

Las figuras IV.2.3.15 y IV.2.3.16 muestran los resultados de EDT por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados, con presencia de público y sin ella, por frecuencias.

Se observa que a frecuencias bajas la presencia del público influye muy poco en el EDT para el uso del culto, obteniendo valores prácticamente iguales para la Basílica llena que vacía. En el caso del Misteri hay algo más de diferencia pero se siguen obteniendo los mismos valores en algunos puntos con público que en otros sin él.

A frecuencias medias-altas la influencia del público aumenta, así como la diferencia entre una configuración y otra. De nuevo los valores obtenidos para el culto con la Basílica llena son similares a los del Misteri vacía.

A 4000 Hz la influencia de la audiencia prácticamente desaparece en el caso del culto y se reduce mucho en el de la representación teatral.

El comportamiento es muy similar al obtenido en la Basílica de Sant Jaume de Algemés (Segura et al. 2011), apreciándose mayores diferencias entre puntos que en el caso del tiempo de reverberación, aún sin ser excesivas.

La tabla IV.2.3.22 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias máximas de nuevo se producen a 1000 Hz, con valores de 0,84 segundos para el culto y 1,15 segundos en el Misteri, ligeramente superiores a los del RT. En el resto de frecuencias las diferencias para la configuración del Misteri son siempre superiores con valores entre 0,36 y 0,94 segundos frente a las variaciones en el rango comprendido entre 0,16 y 0,65 que tienen lugar en el culto.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos.

Al igual que ocurre con el tiempo de reverberación, en términos de percepción resulta llamativo que no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para el culto a frecuencias entre 125 y 500 Hz incluidas. Los máximos se encuentran de nuevo a 1000 y 2000 Hz con valores de 2,77 y 2,47 JND respectivamente.

Para el caso del Misteri existen diferencias perceptibles a todas las frecuencias que superan los 4,5 JND a 1000 Hz.

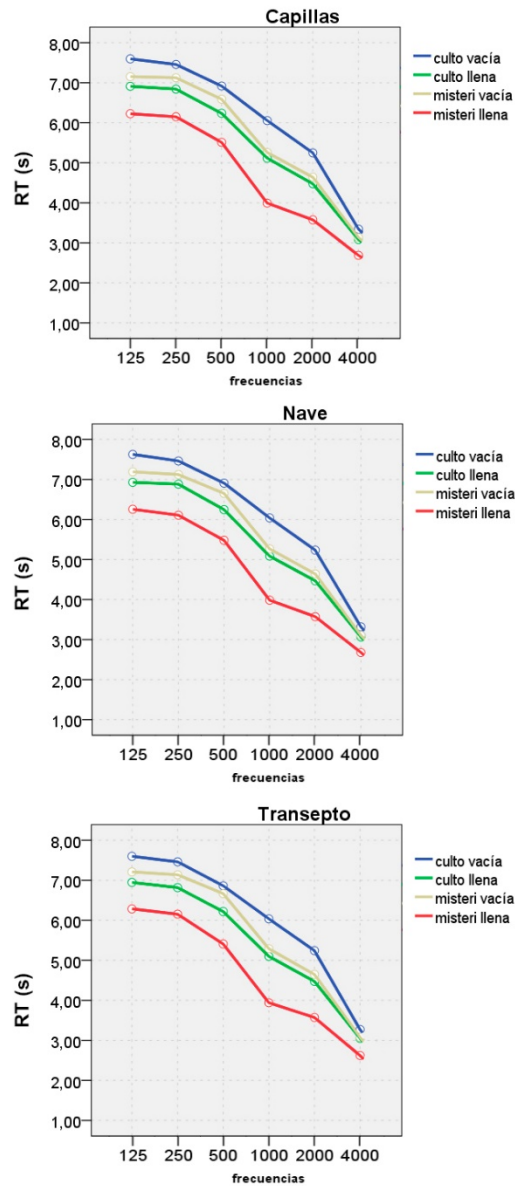


Figura IV.2.3.14. Valores medios de RT simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

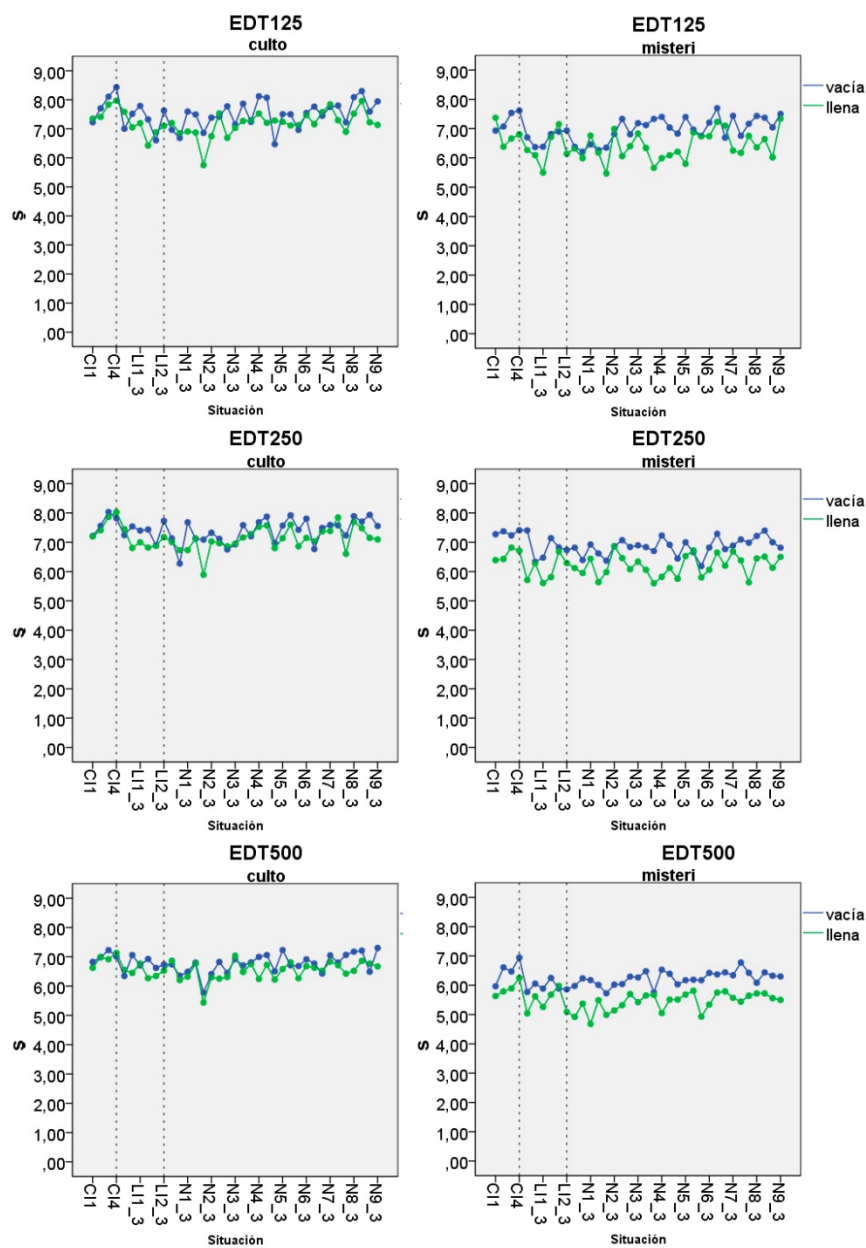


Figura IV.2.3.15. Valores de EDT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500.

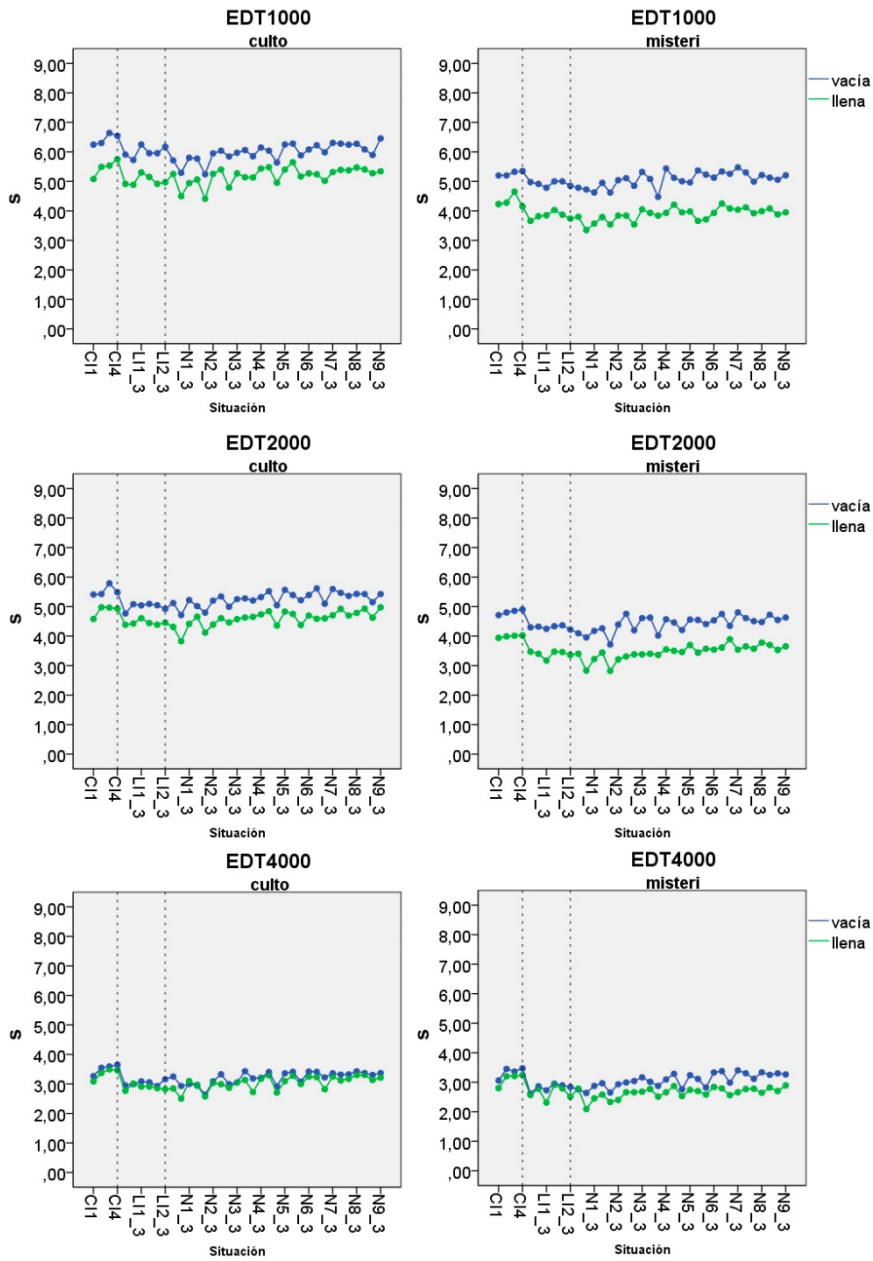


Figura IV.2.3.16. Valores de EDT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.27. Comparación de los valores medios de EDT simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Dif.	p-valor	Dif. JND
EDT125	culto	vacía	7,510	0,062	0,307	0,001	0,82
		llena	7,203	0,062			
	misteri	vacía	6,977	0,062	0,535	<0,001	1,53
		llena	6,442	0,087			
EDT250	culto	vacía	7,407	0,052	0,253	0,001	0,68
		llena	7,154	0,052			
	misteri	vacía	6,899	0,052	0,676	<0,001	1,96
		llena	6,222	0,073			
EDT500	culto	vacía	6,786	0,041	0,225	<0,001	0,66
		llena	6,561	0,041			
	misteri	vacía	6,218	0,041	0,729	<0,001	2,34
		llena	5,489	0,059			
EDT1000	culto	vacía	6,035	0,037	0,837	<0,001	2,77
		llena	5,198	0,037			
	misteri	vacía	5,064	0,037	1,144	<0,001	4,52
		llena	3,920	0,052			
EDT2000	culto	vacía	5,248	0,033	0,649	<0,001	2,47
		llena	4,599	0,033			
	misteri	vacía	4,446	0,033	0,940	<0,001	4,23
		llena	3,506	0,047			
EDT4000	culto	vacía	3,215	0,030	0,167	<0,001	1,04
		llena	3,048	0,030			
	misteri	vacía	3,056	0,030	0,360	<0,001	2,36
		llena	2,696	0,042			

Si se observan los valores medios por frecuencias desglosados por zonas que se muestran en la figura IV.2.3.17, se identifica que es en la zona de las capillas en la que la influencia del público es menor, lo que parece lógico ya que los bancos en los que se sitúa la audiencia se ubican en la nave y el transepto. Por lo demás la tendencia es la misma en las tres zonas y los valores muy similares.

La presencia de público influye algo más sobre los valores de EDT que sobre el RT.

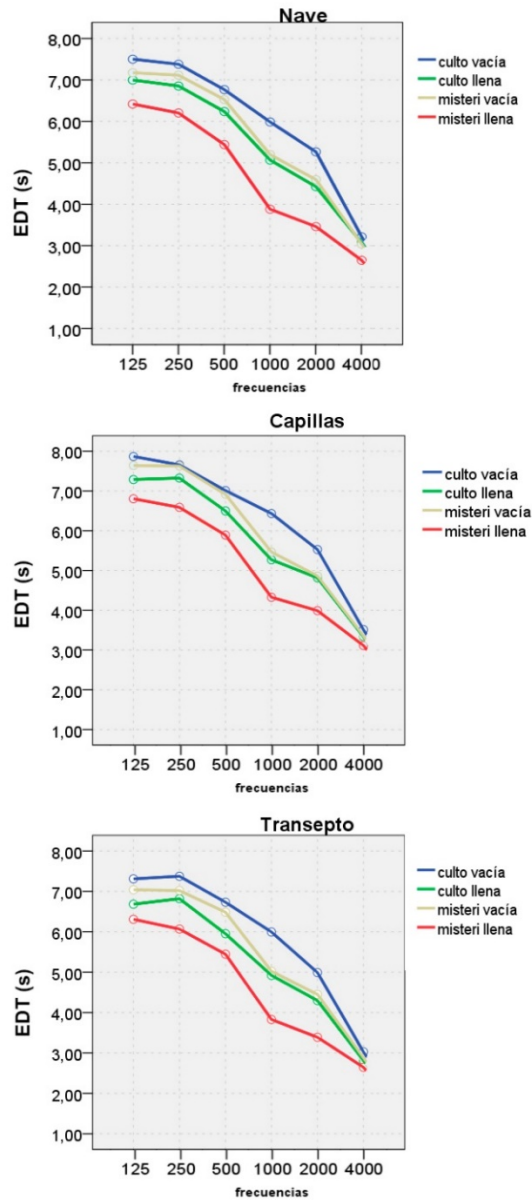


Figura IV.2.3.17. Valores medios de EDT simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

IV.2.3.3.2 Influencia del público en los parámetros de energía

Las figuras IV.2.3.18 y IV.2.3.19 muestra los resultados del parámetro C50 por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

Se aprecia una diferencia importante en los valores registrados en los primeros puntos de los gráficos correspondientes a las capillas respecto a los demás que siguen una tendencia similar. Por otra parte, se observa que la presencia de la audiencia no influye de igual manera en el caso de la configuración para el culto que en la del Misteri, al contrario de lo que ocurría en los parámetros de reverberación.

A frecuencias bajas los valores de C50 para el culto con la Basílica llena y vacía se mezclan por lo que se puede afirmar que no existen diferencias. A 500 Hz empieza a observarse una sutil variación siendo algo superiores los valores de C50 con presencia de público, esto ocurre también a 1000 y 2000 Hz mientras que a 4000 Hz vuelve a ser difícil la diferenciación. Se observa claramente que en los puntos situados en el centro de la nave la claridad es mayor que en los laterales, esto se acentúa ligeramente cuando la Basílica está llena.

La influencia del público en la representación del Misteri es mayor. A todas las frecuencias se observan diferencias claras en el comportamiento del parámetro C50 en función de la ocupación. A frecuencias bajas y medias los resultados para la Basílica vacía presentan menor variabilidad entre puntos y valores ligeramente más altos. A 1000 y 2000 Hz las líneas se entrecruzan volviendo a separarse a 4000 Hz. El diferente comportamiento entre los puntos centrales de la nave y los de los laterales detectado en la configuración del culto se produce también en este caso, y se ve acentuado con la presencia de público.

La tabla IV.2.3.23 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias máximas se producen a 2000 Hz en el caso del culto y a 125 Hz en el caso del Misteri, con valores de 0,92 y 1,36 dB respectivamente. Llama la atención que mientras la comparación por puntos apuntaba a que existían mayores diferencias para la configuración teatral, el contraste de valores medios muestra lo contrario.

A frecuencias bajas y altas las diferencias para la configuración del Misteri son superiores, mientras que a frecuencias medias-altas ocurre al revés.

Únicamente existe diferencia estadísticamente significativa para la configuración del Misteri a 500 y 1000 Hz.

En términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para ningún uso, siendo la máxima de 0,61 JND para el culto a 2000 Hz. Se puede concluir por tanto, que atendiendo a valores medios de sala, la presencia del público en la Basílica no influye sobre el parámetro C50.

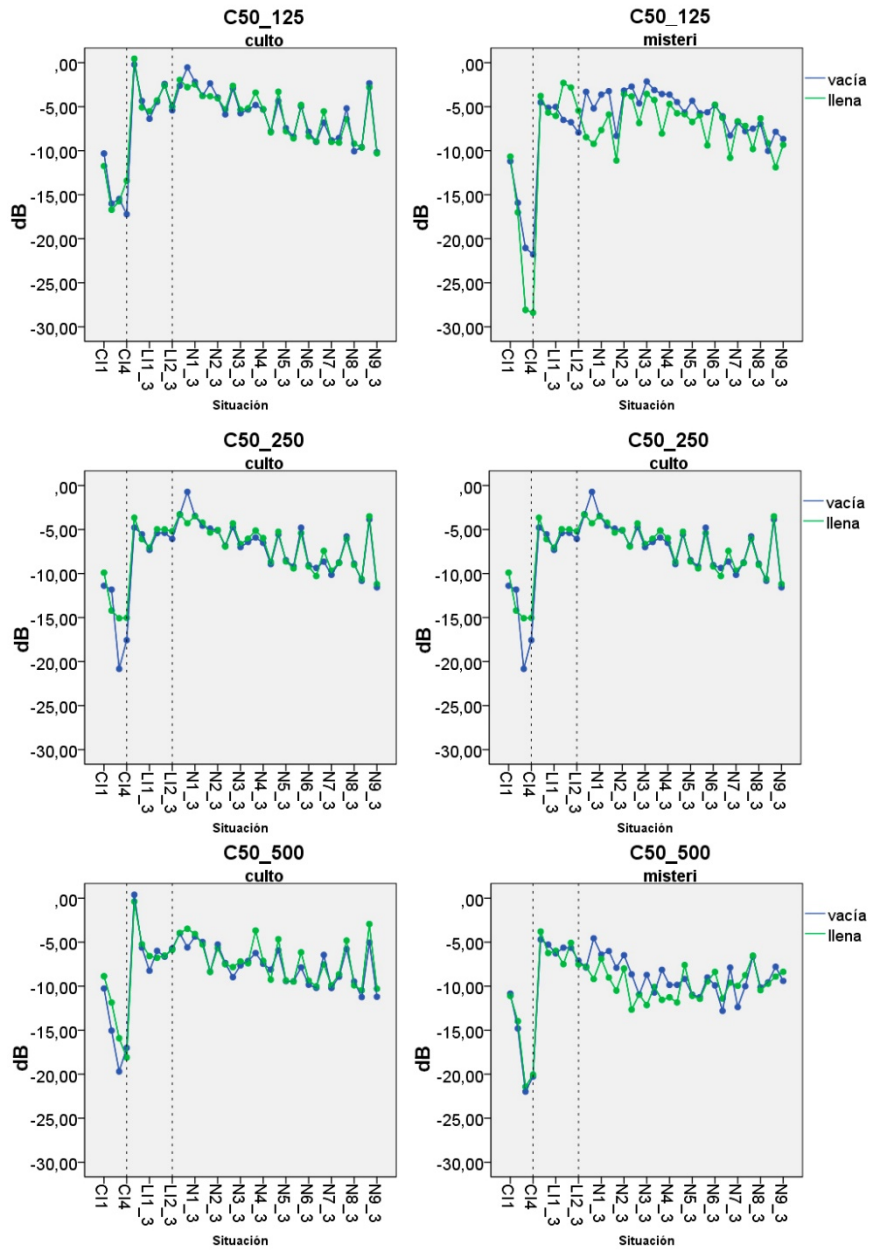


Figura IV.2.3.18. Valores de C50 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

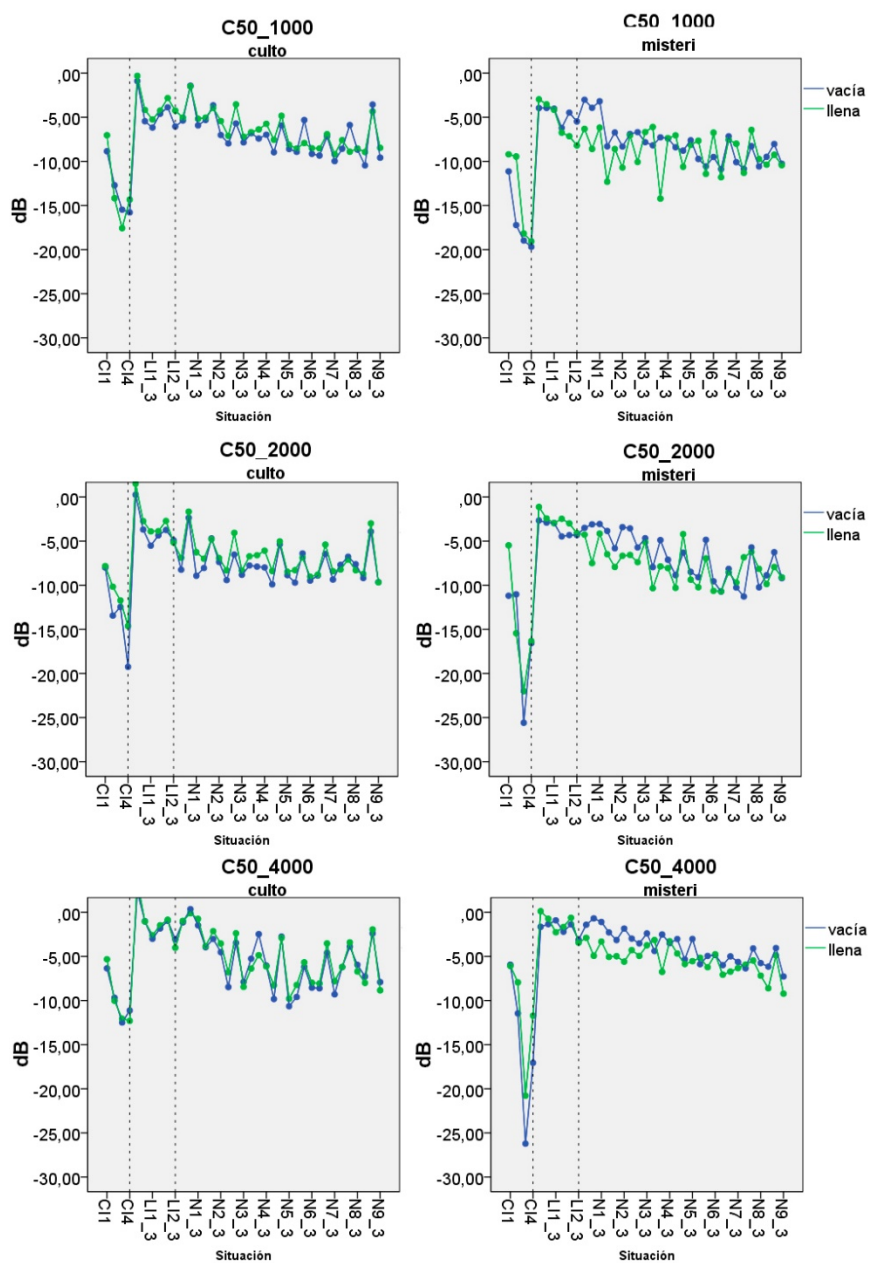


Figura IV.2.3.19. Valores de C50 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.28. Comparación de los valores medios de C50 simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
C50_125	culto	vacía	-6,461	0,541	-0,049	0,624	0,03
		llena	-6,412	0,541			
	misteri	vacía	-6,837	0,541	1,359	0,058	0,91
		llena	-8,195	0,766			
C50_250	culto	vacía	-7,552	0,467	-0,255	0,359	0,17
		llena	-7,298	0,467			
	misteri	vacía	-8,160	0,467	0,628	0,067	0,42
		llena	-8,788	0,661			
C50_500	culto	vacía	-8,120	0,471	-0,539	0,068	0,36
		llena	-7,581	0,471			
	misteri	vacía	-9,343	0,471	0,556	0,005	0,37
		llena	-9,898	0,666			
C50_1000	culto	vacía	-7,333	0,465	-0,471	0,088	0,31
		llena	-6,862	0,465			
	misteri	vacía	-8,460	0,465	0,440	0,012	0,29
		llena	-8,901	0,658			
C50_2000	culto	vacía	-7,635	0,493	-0,915	0,642	0,61
		llena	-6,720	0,493			
	misteri	vacía	-7,311	0,493	0,431	0,233	0,29
		llena	-7,742	0,697			
C50_4000	culto	vacía	-5,358	0,513	-0,225	0,459	0,15
		llena	-5,133	0,513			
	misteri	vacía	-4,821	0,513	0,629	0,722	0,42
		llena	-5,450	0,726			

A título ilustrativo, la figura IV.2.3.20 muestra los valores medios por frecuencias del parámetro C50 desglosados por zonas. Se observa que el comportamiento del parámetro en las capillas se aleja de las otras dos zonas y se obtienen valores considerablemente peores. Además en esta zona se observan mayores diferencias entre unas situaciones y otras, y los valores aumentan con la frecuencia.

La nave y el transepto presentan un comportamiento similar entre ellos. La influencia del público en el parámetro C50 es menor en estas zonas, sobretodo en el transepto y los valores disminuyen ligeramente a frecuencias medias respecto a las altas y bajas.

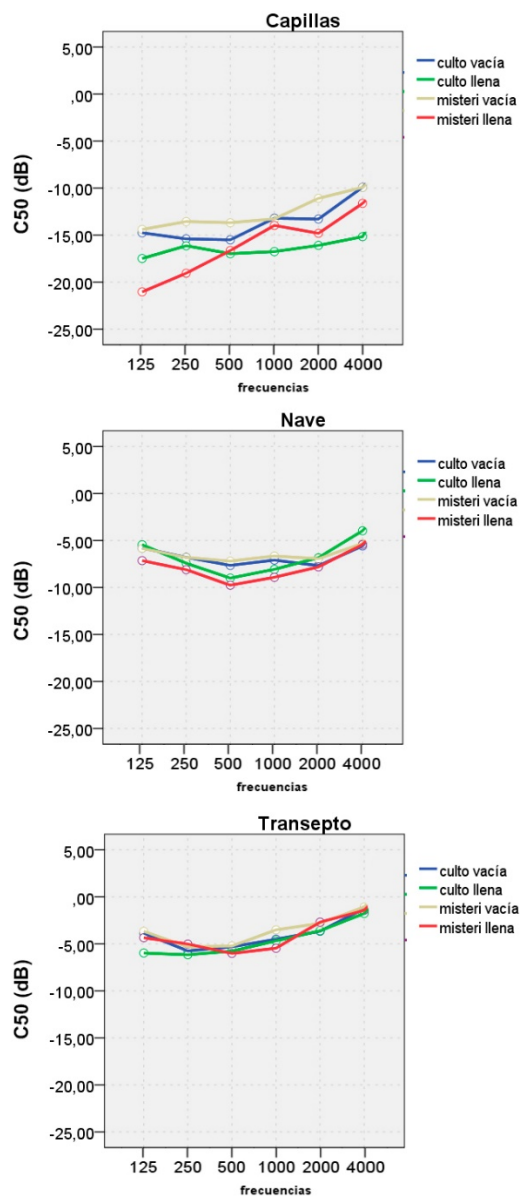


Figura IV.2.3.20. Valores medios de C50 simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

El comportamiento del parámetro C80 ante la presencia de público es muy similar al anterior. Las figuras IV.2.3.21 y IV.2.3.22 muestran los resultados del parámetro por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

Se aprecia una diferencia importante en los valores registrados en los primeros puntos de los gráficos correspondientes a las capillas respecto a los demás que siguen una tendencia similar. Por otra parte, se observa que la presencia de la audiencia no influye de igual manera en el caso de la configuración para el culto que en la del Misteri, al contrario de lo que ocurría en los parámetros de reverberación.

A prácticamente todas las frecuencias los valores de C80 para el culto con la Basílica llena y vacía se mezclan por lo que se puede afirmar que no existen diferencias. Únicamente se aprecia una variación más clara a 2000 Hz siendo algo superiores los valores de C80 con presencia de público. Es evidente que en los puntos situados en el centro de la nave la claridad es mayor que en los laterales, esto se acentúa en muchos puntos cuando la Basílica está llena.

La influencia del público en la representación del Misteri es mayor. A todas las frecuencias se observan diferencias claras en el comportamiento del parámetro C80 en función de la ocupación. En general los resultados para la Basílica vacía presentan menor variabilidad entre puntos. El diferente comportamiento entre los puntos centrales de la nave y los de los laterales detectado en la configuración del culto se produce también en este caso, y se ve acentuado con la presencia de público a 1000 Hz.

Las diferencias entre puntos centrales y laterales así como la disminución de los valores con la distancia que se dan en los dos parámetros de claridad son del orden de los obtenidos en la Basílica de Sant Jaume de Algemesí (Segura et al., 2011).

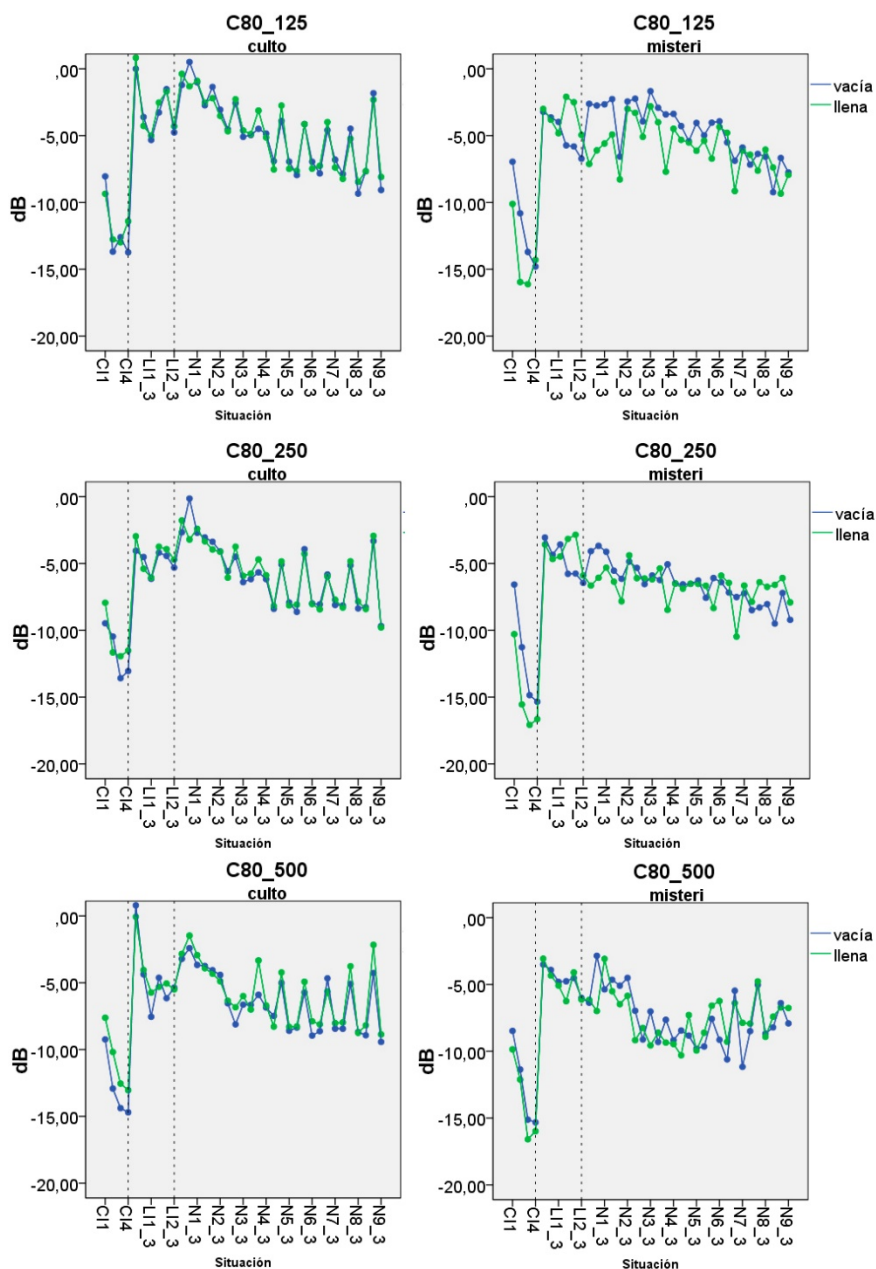


Figura IV.2.3.21. Valores de C80 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

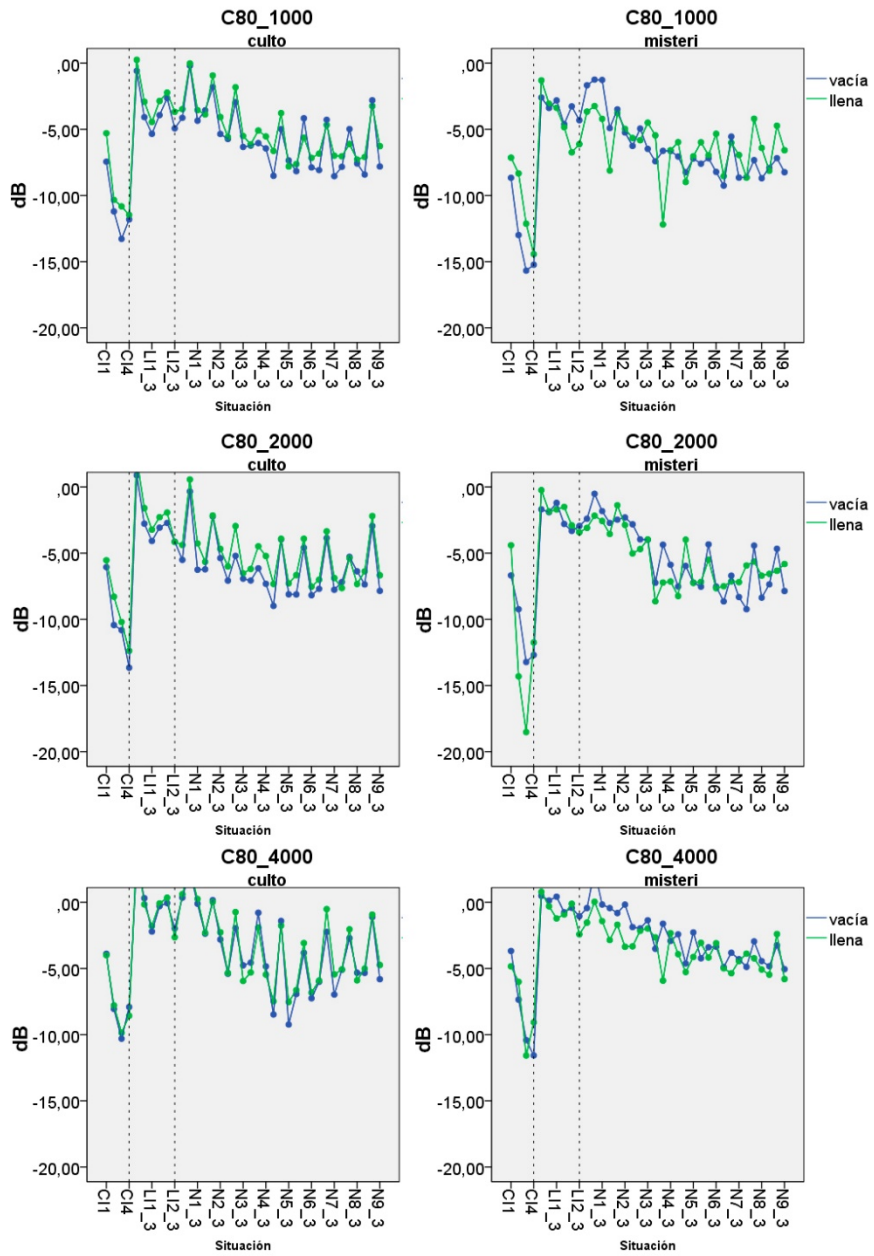


Figura IV.2.3.22. Valores de C80 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.29. Comparación de los valores medios de C80 simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
C80_125	culto	vacía	-5,357	0,418	-0,094	0,898	0,06
		llena	-5,263	0,418			
	misteri	vacía	-5,432	0,418	1,008	0,105	0,67
		llena	-6,441	0,591			
C80_250	culto	vacía	-6,286	0,360	-0,164	0,278	0,11
		llena	-6,122	0,360			
	misteri	vacía	-6,840	0,360	0,338	0,092	0,23
		llena	-7,178	0,509			
C80_500	culto	vacía	-6,796	0,384	-0,604	0,139	0,40
		llena	-6,191	0,384			
	misteri	vacía	-7,602	0,384	0,155	0,019	0,10
		llena	-7,757	0,543			
C80_1000	culto	vacía	-5,940	0,381	-0,708	0,177	0,47
		llena	-5,231	0,381			
	misteri	vacía	-6,668	0,381	-0,286	0,082	0,19
		llena	-6,382	0,538			
C80_2000	culto	vacía	-5,966	0,385	-0,863	0,348	0,58
		llena	-5,103	0,385			
	misteri	vacía	-5,454	0,385	0,261	0,359	0,17
		llena	-5,715	0,544			
C80_4000	culto	vacía	-3,616	0,390	-0,229	0,171	0,15
		llena	-3,387	0,390			
	misteri	vacía	-2,858	0,390	0,659	0,847	0,44
		llena	-3,518	0,552			

La tabla IV.2.3.24 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias máximas se producen a 2000 Hz en el caso del culto y a 125 Hz en el caso del Misteri, con valores de 0,86 y 1,01 dB respectivamente. A frecuencias bajas y altas las diferencias para la configuración del Misteri son superiores, mientras que a 500, 1000 y 2000 Hz ocurre al revés.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para ningún uso, siendo la máxima de 0,58 JND para el culto a 2000 Hz. Se

puede concluir por tanto, que atendiendo a valores medios de sala, la presencia del público en la Basílica no influye sobre el parámetro C80.

A título ilustrativo, la figura IV.2.3.23 muestra los valores medios por frecuencias del parámetro C80 desglosados por zonas. Se observa que el comportamiento del parámetro en la nave y el transepto corresponde con el definido por los valores medios de sala con escasas diferencias entre las cuatro situaciones analizadas. No obstante, las capillas presentan mayores diferencias sobre todo en el caso del Misteri.

Las figuras IV.2.3.24 y IV.2.3.25 muestran los resultados de Ts por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados, con presencia de público y sin ella, por frecuencias.

Se observa que a frecuencias bajas la presencia del público influye muy poco en el tiempo central para el uso del culto, obteniendo valores ligeramente superiores para la Basílica vacía. A frecuencias medias-altas la influencia del público aumenta observándose dos líneas prácticamente iguales pero desplazadas. A 4000 Hz la influencia de la audiencia prácticamente desaparece en el caso del culto.

En el caso del Misteri sí que se aprecian diferencias claras a todas las frecuencias excepto a 4000 Hz. Los valores son superiores para la Basílica vacía.

En ambos usos los puntos situados en el centro de la nave presentan tiempos centrales menores que en los laterales, este hecho se suaviza cuando la Basílica está llena para el caso del Misteri.

La tabla IV.2.3.25 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias para el uso del culto son despreciables con un valor máximo de 59 ms a 1000 Hz. Para el uso teatral se obtienen mayores diferencias con valores que van desde 70 ms a 4000 Hz hasta un máximo de 186 ms a 250 Hz.

Existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos.

En términos de percepción no existen diferencias

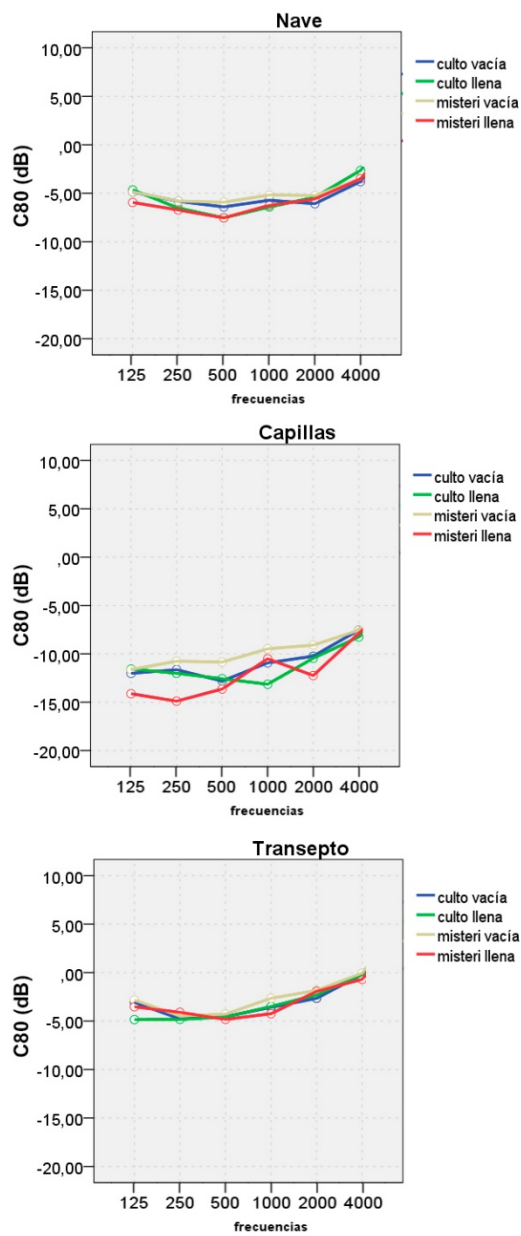


Figura IV.2.3.23. Valores medios de C80 simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

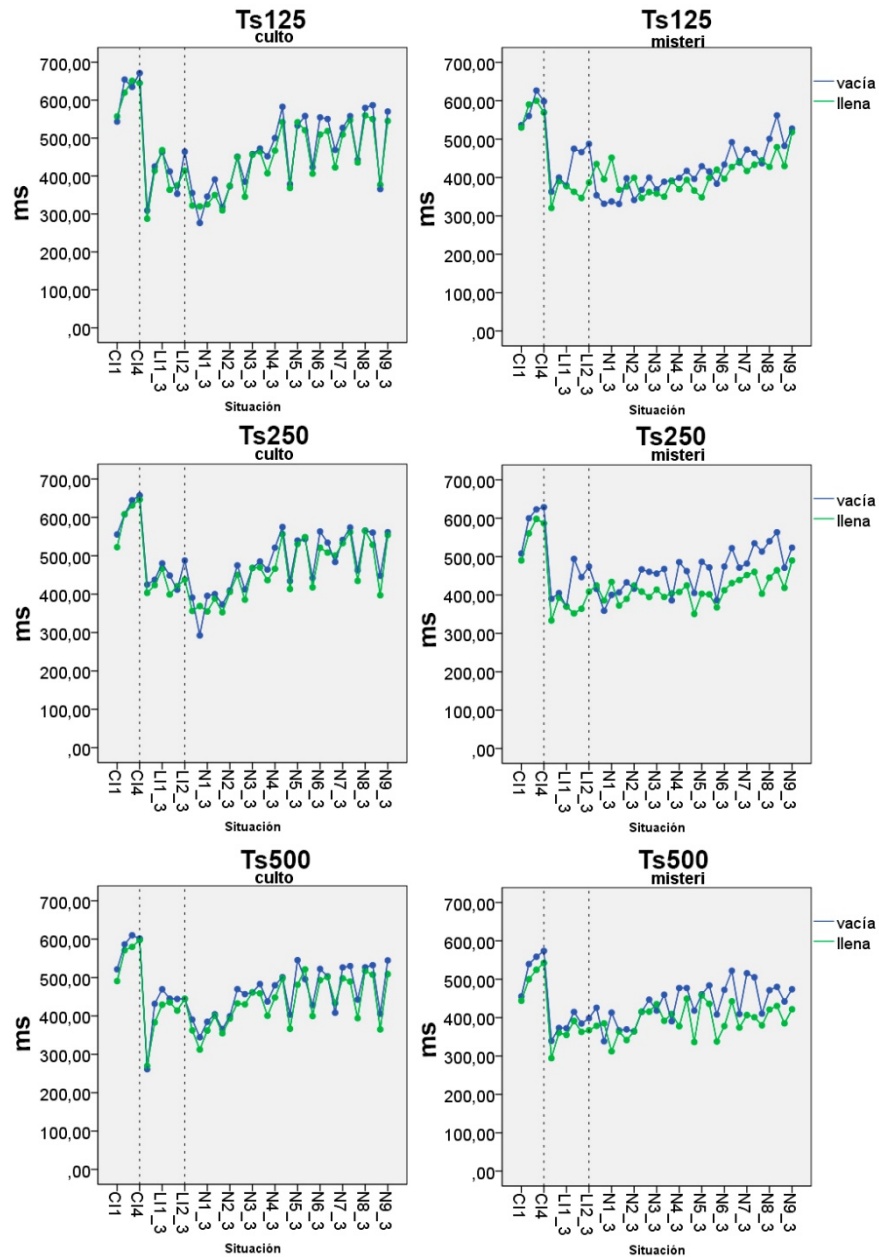


Figura IV.2.3.24. Valores de Ts simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

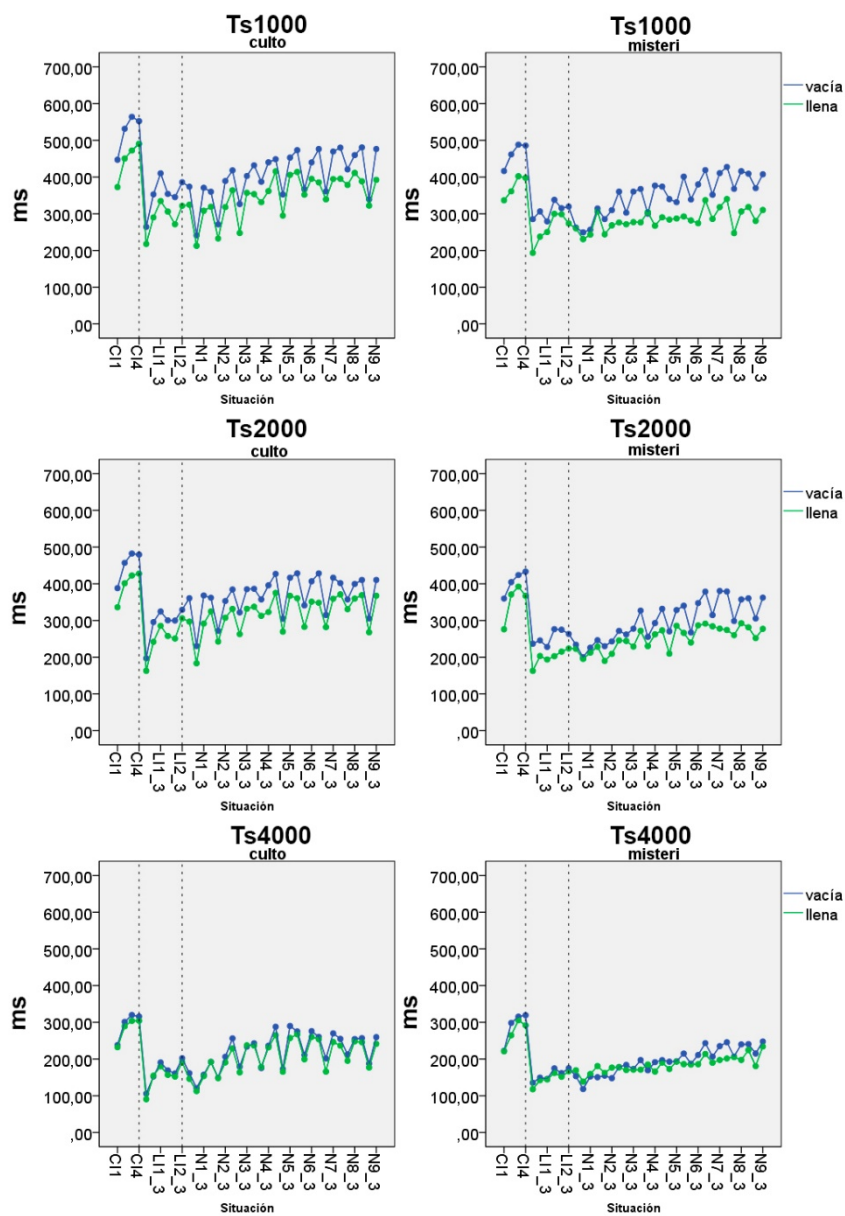


Figura IV.2.3.25. Valores de Ts simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.30. Comparación de los valores medios de Ts simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
Ts125	culto	vacía	469,998	16,212	17,525	<0,001	0,04
		llena	452,473	16,212			
	misteri	vacía	364,256	16,212	162,438	<0,001	0,52
		llena	201,818	22,928			
Ts250	culto	vacía	488,487	15,775	17,317	<0,001	0,04
		llena	471,171	15,775			
	misteri	vacía	396,183	15,775	186,482	<0,001	0,55
		llena	209,701	22,309			
Ts500	culto	vacía	465,066	14,915	21,647	<0,001	0,05
		llena	443,419	14,915			
	misteri	vacía	369,376	14,915	165,832	<0,001	0,53
		llena	203,543	21,093			
Ts1000	culto	vacía	408,628	12,239	58,813	<0,001	0,17
		llena	349,816	12,239			
	misteri	vacía	297,294	12,239	152,762	<0,001	0,60
		llena	144,532	17,308			
Ts2000	culto	vacía	364,873	10,638	48,657	<0,001	0,16
		llena	316,216	10,638			
	misteri	vacía	250,695	10,638	124,741	<0,001	0,59
		llena	125,954	15,045			
Ts4000	culto	vacía	219,902	8,008	11,865	<0,001	0,06
		llena	208,037	8,008			
	misteri	vacía	162,152	8,008	70,218	<0,001	0,51
		llena	91,934	11,325			

Si se observan los valores medios por frecuencias desglosados por zonas que se muestran en la figura IV.2.3.26, se identifica que la influencia del público es muy similar en las tres zonas, aunque un poco superior en el transepto, sobre todo a frecuencias medias.

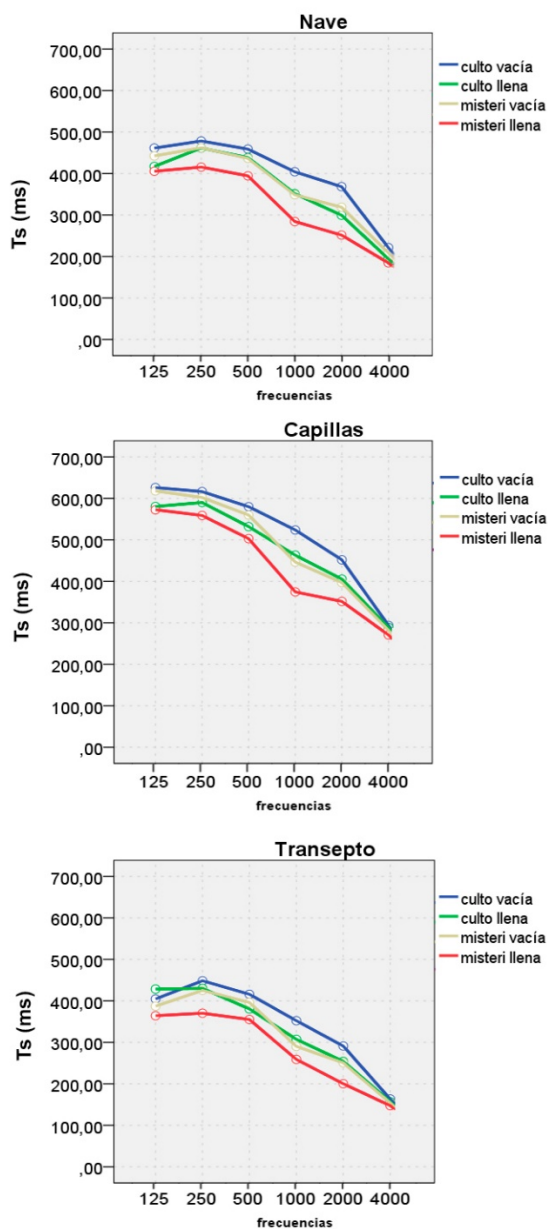


Figura IV.2.3.26. Valores medios de T_s simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

Las figuras IV.2.3.27 y IV.2.3.28 muestran los resultados del parámetro G por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

Se aprecia una diferencia importante en los valores registrados en los primeros puntos de los gráficos correspondientes a las capillas respecto a los demás que siguen una tendencia similar. Por otra parte, se observa que la presencia de la audiencia no influye de igual manera en el caso de la configuración para el culto que en la del Misteri.

A frecuencias bajas los valores de G para el culto con la Basílica llena y vacía se mezclan por lo que se puede afirmar que no existen diferencias. A 1000 y 2000 Hz se observa una pequeña variación siendo algo superiores los valores de G sin público. A 4000 Hz vuelve a ser difícil la diferenciación. Se observa también que en los puntos situados en el centro de la nave la fuerza es mayor que en los laterales.

La influencia del público en la representación del Misteri es mayor. A todas las frecuencias se observan diferencias claras en el comportamiento del parámetro G en función de la ocupación, aunque estas son mayores a frecuencias medias-altas. El diferente comportamiento entre los puntos centrales de la nave y los de los laterales, detectado en la configuración del culto, se produce también en este caso.

La tabla IV.2.3.26 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias máximas se producen a 1000 Hz en ambos casos con valores de 0,95 y 2,24 dB respectivamente. A todas las frecuencias las diferencias para la configuración del Misteri son superiores.

Para el uso teatral, existe diferencia estadísticamente significativa en todos los casos mientras que para la configuración del culto únicamente existe a 1000 y 2000 Hz.

En términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para el culto, pero sí para el Misteri a todas las frecuencias, siendo la máxima de 2,24 JND a 1000 Hz. Atendiendo a valores medios de sala, la presencia del público en la Basílica no influye sobre el parámetro G, para el uso del culto.

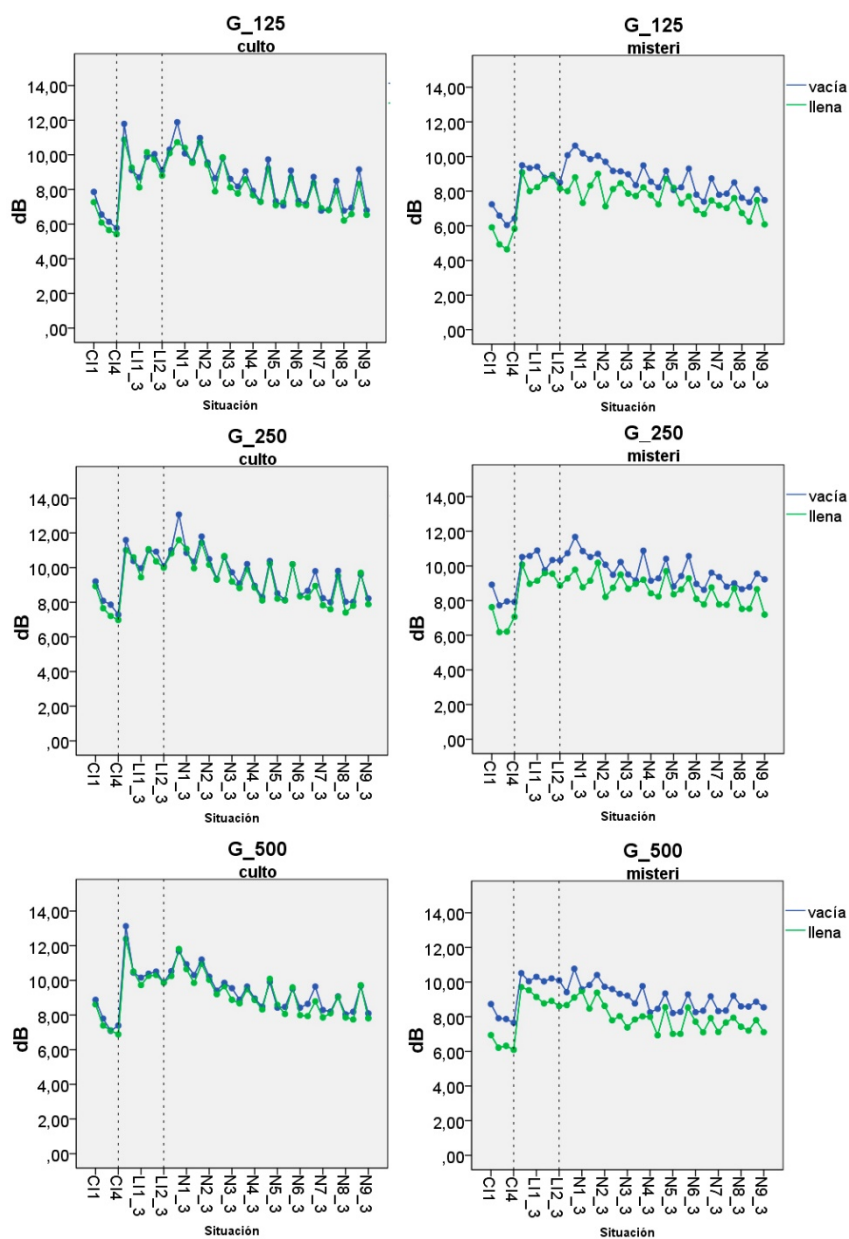


Figura IV.2.3.27. Valores de G simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

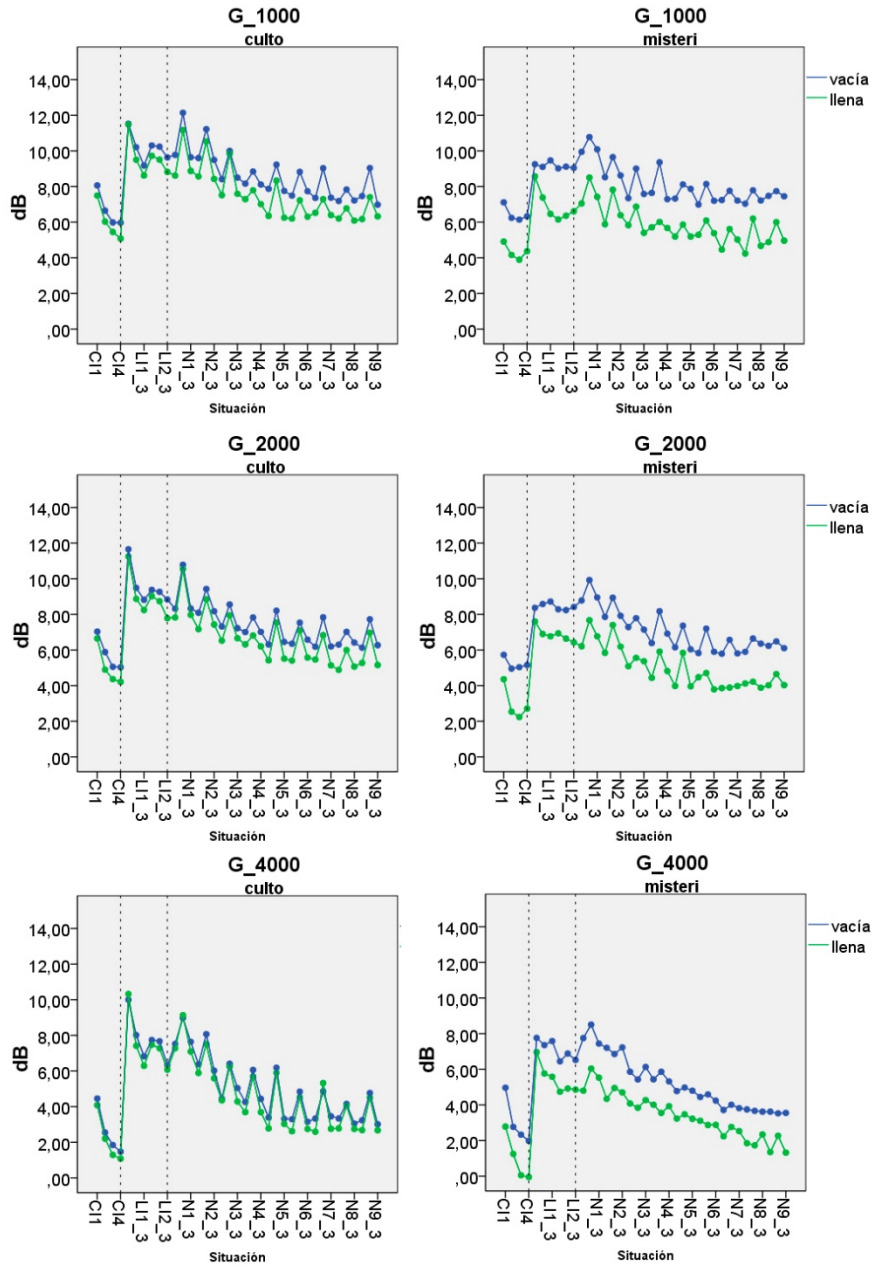


Figura IV.2.3.28. Valores de G simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.31. Comparación de los valores medios de G simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
G_125	culto	vacía	8,517	0,168	0,313	0,190	0,31
		llena	8,204	0,168			
	misteri	vacía	8,553	0,168	1,050	<0,001	1,05
		llena	7,503	0,238			
G_250	culto	vacía	9,571	0,145	0,297	0,148	0,30
		llena	9,274	0,145			
	misteri	vacía	9,647	0,145	1,103	<0,001	1,10
		llena	8,545	0,204			
G_500	culto	vacía	9,403	0,138	0,244	0,215	0,24
		llena	9,159	0,138			
	misteri	vacía	9,131	0,138	1,184	<0,001	1,18
		llena	7,947	0,196			
G_1000	culto	vacía	8,648	0,169	0,952	<0,001	0,95
		llena	7,696	0,169			
	misteri	vacía	8,086	0,169	2,236	<0,001	2,24
		llena	5,850	0,239			
G_2000	culto	vacía	7,568	0,180	0,767	0,003	0,77
		llena	6,801	0,180			
	misteri	vacía	7,079	0,180	2,004	<0,001	2,00
		llena	5,076	0,255			
G_4000	culto	vacía	5,122	0,244	0,375	0,279	0,37
		llena	4,747	0,244			
	misteri	vacía	5,262	0,244	1,801	<0,001	1,80
		llena	3,461	0,345			

A título ilustrativo, la figura IV.2.3.29 muestra los valores medios por frecuencias del parámetro G desglosados por zonas. El comportamiento es similar en las tres zonas coincidiendo con el descrito a partir de los valores medios ya que no existe apenas diferencia para el culto pero sí para el Misteri.

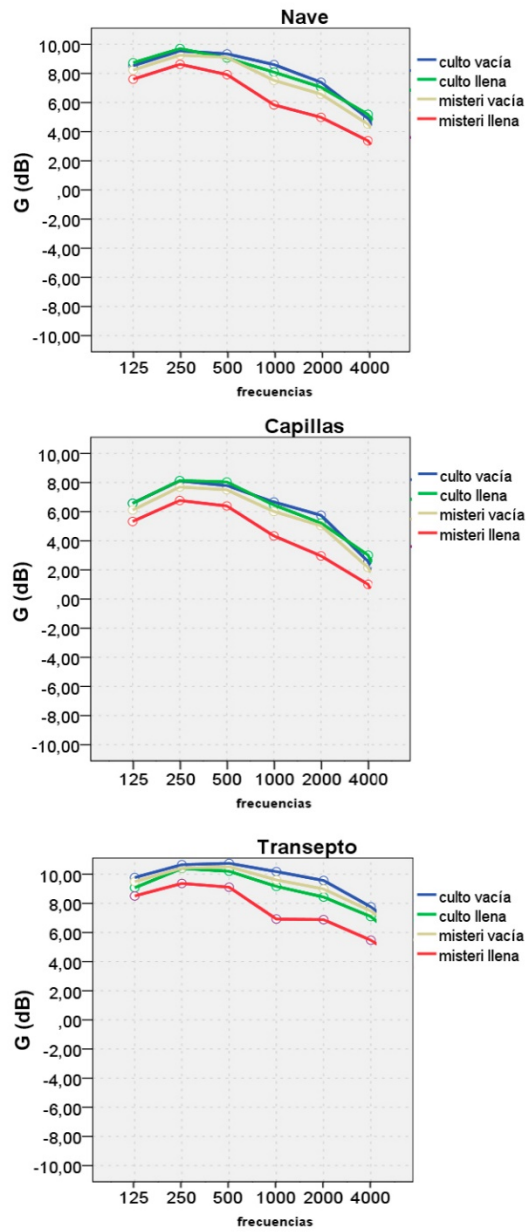


Figura IV.2.3.29. Valores medios de G simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

IV.2.3.3.3 Influencia del público en la inteligibilidad

La figura IV.2.3.30 muestra los resultados del parámetro STI por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella.

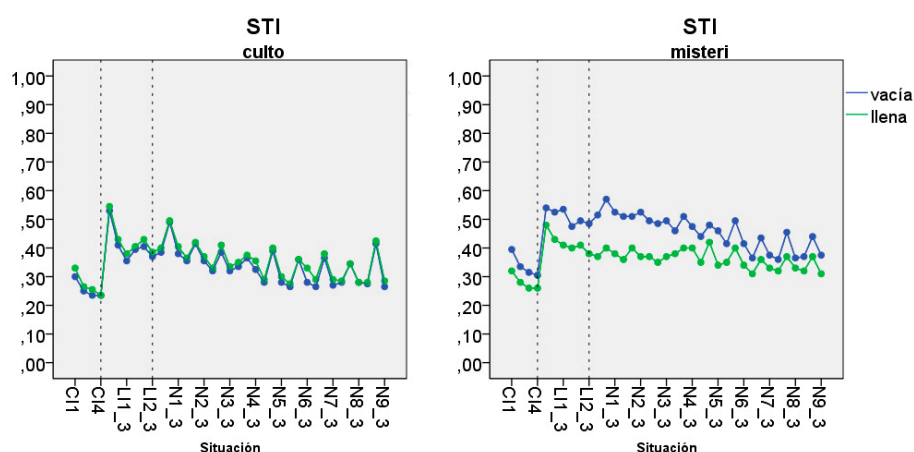


Figura IV.2.3.30. Valores de STI simulados por puntos para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena.

Se aprecia una diferencia importante en los valores registrados en los primeros puntos de los gráficos correspondientes a las capillas respecto a los demás que siguen una tendencia similar. Por otra parte, se observa que la presencia de la audiencia no influye de igual manera en el caso de la configuración para el culto que en la del Misteri.

Los valores de STI para el culto con la Basílica llena y vacía se mezclan por lo que se puede afirmar que no existen diferencias. Se observa también que en los puntos situados en el centro de la nave la inteligibilidad es mayor que en los laterales.

La influencia del público en la representación del Misteri es mayor. Sorprendentemente, los resultados muestran que la inteligibilidad es mayor cuando la Basílica se encuentra vacía.

El diferente comportamiento entre los puntos centrales de la nave y los de los laterales, detectado en la configuración del culto, se produce también en este caso.

Tabla IV.2.3.32. Comparación de los valores medios de STI simulados, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena
STI	culto	vacía	0,334	0,011	-0,016
		llena	0,350	0,011	
	misteri	vacía	0,434	0,011	0,081
		llena	0,353	0,015	

La tabla IV.2.3.27 incluye los valores medios de STI para los dos usos con presencia de público y sin ella. Como ya se ha adelantado en el análisis por puntos, para el uso de culto se puede considerar que no existe diferencia. En el caso de la representación teatral, el valor empeora con el llenado de la Basílica.

Tabla IV.2.3.33. Comparación de los valores medios de STI simulados por zonas, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena
culto	capillas	vacía	,255	,023	-0,016
		llena	,271	,023	
	nave	vacía	,335	,009	-0,014
		llena	,349	,009	
	transept	vacía	,411	,019	-0,018
		llena	,429	,019	
misteri	capillas	vacía	,338	,023	0,057
		llena	,280	,033	
	nave	vacía	,456	,009	0,094
		llena	,362	,013	
	transept	vacía	,509	,019	0,091
		llena	,418	,027	

La tabla IV.2.3.28 incluye los valores medios por zonas de STI para los dos usos con presencia de público y sin ella. En el culto los valores son muy parecidos a los generales sin existir apenas diferencia entre lleno y vacío. En el caso del Misteri se observa que las diferencias son mayores en la nave y el transepto que en las capillas.

IV.2.3.3.4 Influencia del público en los parámetros de espacialidad

Las figuras IV.2.3.31 y IV.2.3.32 muestra los resultados del parámetro IACCA por puntos de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

El comportamiento es similar para ambas configuraciones con algunas variaciones. A frecuencias bajas y altas los valores de IACCA para los dos usos con la Basílica llena y vacía se mezclan por lo que se puede afirmar que no existen diferencias. A 500 y 1000 Hz la presencia del público sí influye sobre los resultados en el caso del Misteri, incrementando las desigualdades entre los puntos centrales de nave respecto a los laterales, desde aproximadamente la mitad a las últimas filas de bancos.

La tabla IV.2.3.29 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias son despreciables ya que no superan el valor de 0,05.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para ningún uso.

Si se analizan los resultados por zonas, tal y como muestra la figura IV.2.3.33, se observa que aunque en todas ellas los valores son altos a frecuencias bajas y van bajando para subir de nuevo a 4000 Hz, el comportamiento no es el mismo. Para el uso del culto, la presencia de público provoca un ligero descenso de los valores de IACCA en la nave a frecuencias medias-altas, mientras que en las capillas se produce un incremento de dichos valores para frecuencias medias. En la zona del transepto, no existen diferencias a frecuencias bajas y medias, aumentando el valor del parámetro con la Basílica llena a partir de 1000 Hz.

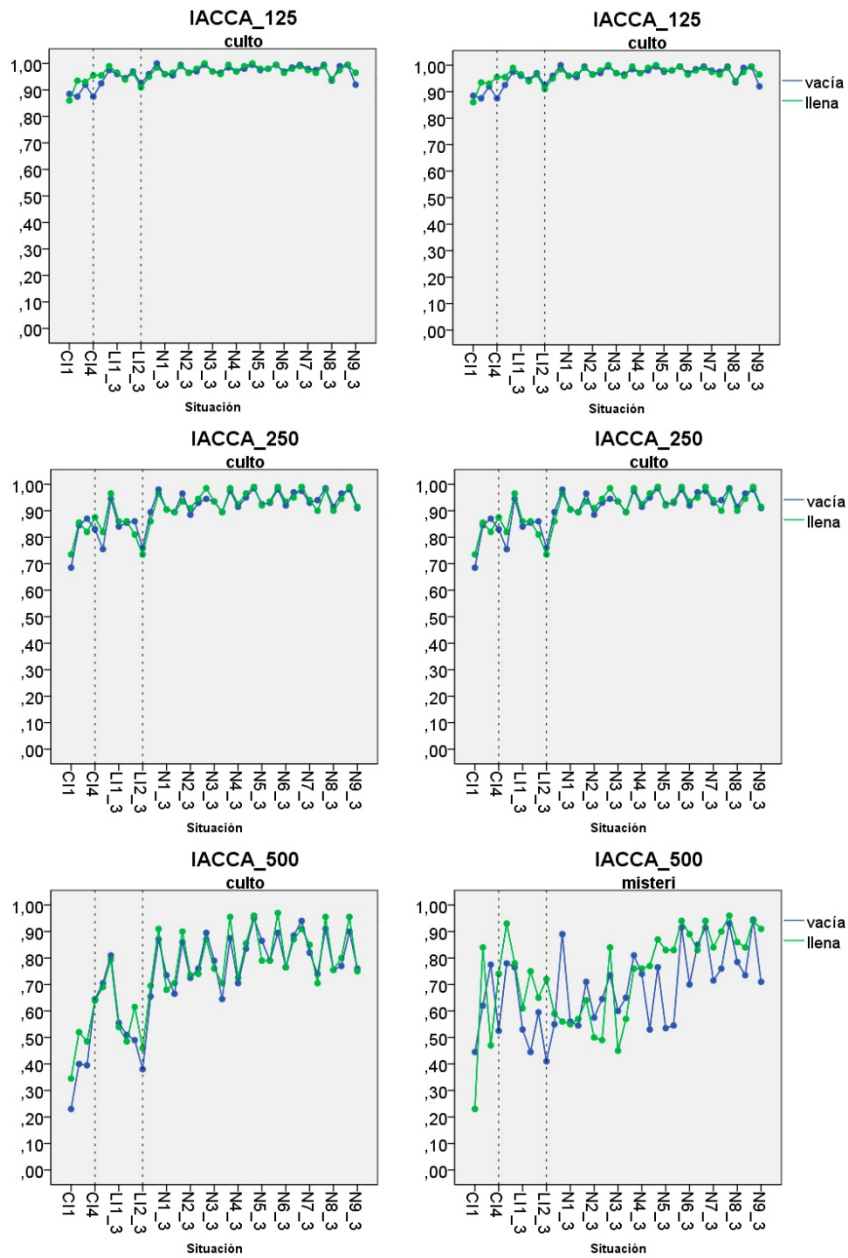


Figura IV.2.3.31. Valores de IACCA simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

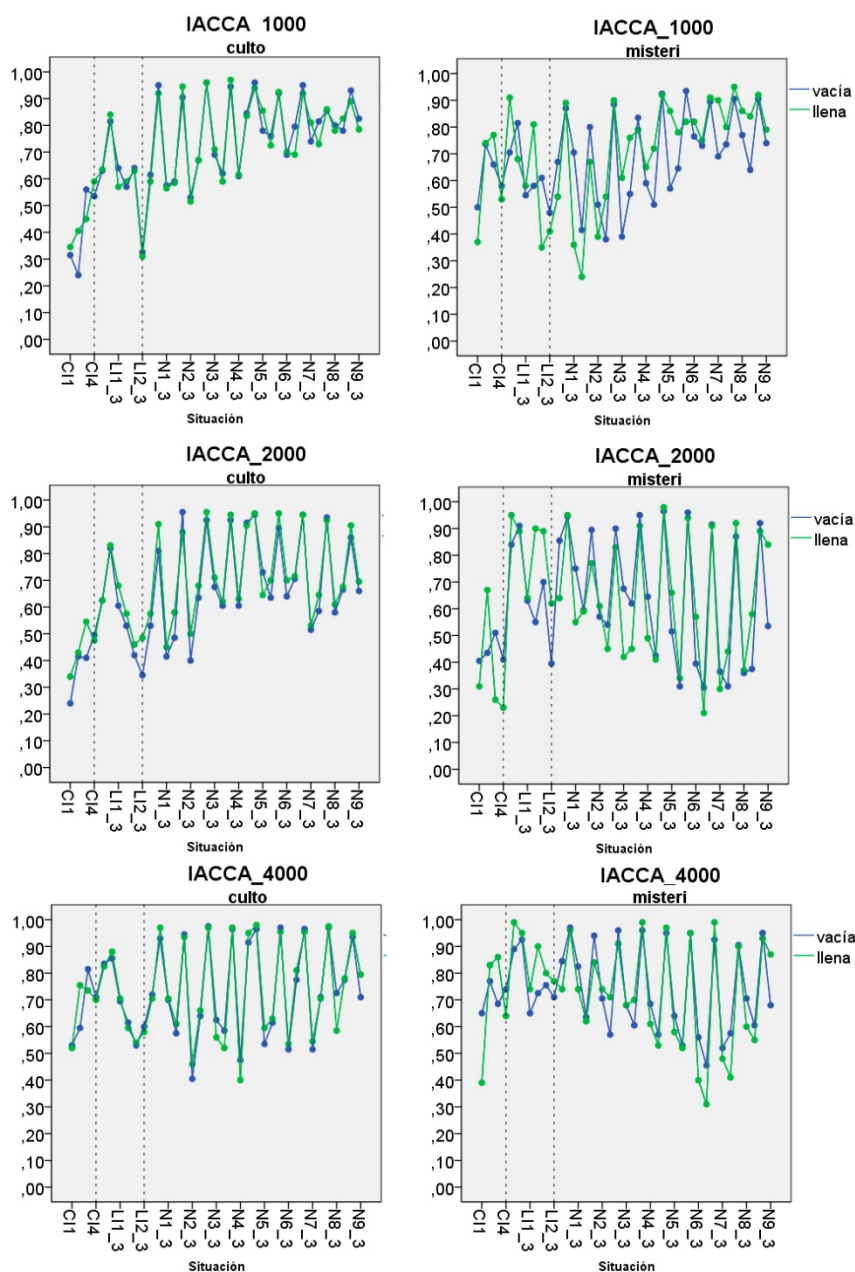


Figura IV.2.3.32. Valores de IACCA simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.34. Comparación de los valores medios de IACCA simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
IACCA_125	culto	vacía	0,962	0,004	-0,005	0,474	0,06
		llena	0,967	0,004			
	misteri	vacía	0,966	0,004	-0,004	0,573	0,06
		llena	0,971	0,005			
IACCA_250	culto	vacía	0,909	0,009	-0,003	0,256	0,03
		llena	0,911	0,009			
	misteri	vacía	0,895	0,009	-0,027	0,498	0,34
		llena	0,922	0,012			
IACCA_500	culto	vacía	0,726	0,022	-0,020	0,147	0,26
		llena	0,747	0,022			
	misteri	vacía	0,682	0,022	-0,052	0,727	0,65
		llena	0,734	0,031			
IACCA_1000	culto	vacía	0,713	0,023	0,003	0,313	0,04
		llena	0,710	0,023			
	misteri	vacía	0,680	0,023	-0,026	0,924	0,32
		llena	0,706	0,032			
IACCA_2000	culto	vacía	0,651	0,026	-0,035	0,540	0,44
		llena	0,686	0,026			
	misteri	vacía	0,628	0,026	-0,004	0,229	0,04
		llena	0,632	0,037			
IACCA_4000	culto	vacía	0,727	0,022	-0,004	0,667	0,04
		llena	0,731	0,022			
	misteri	vacía	0,741	0,022	0,008	0,968	0,10
		llena	0,732	0,030			

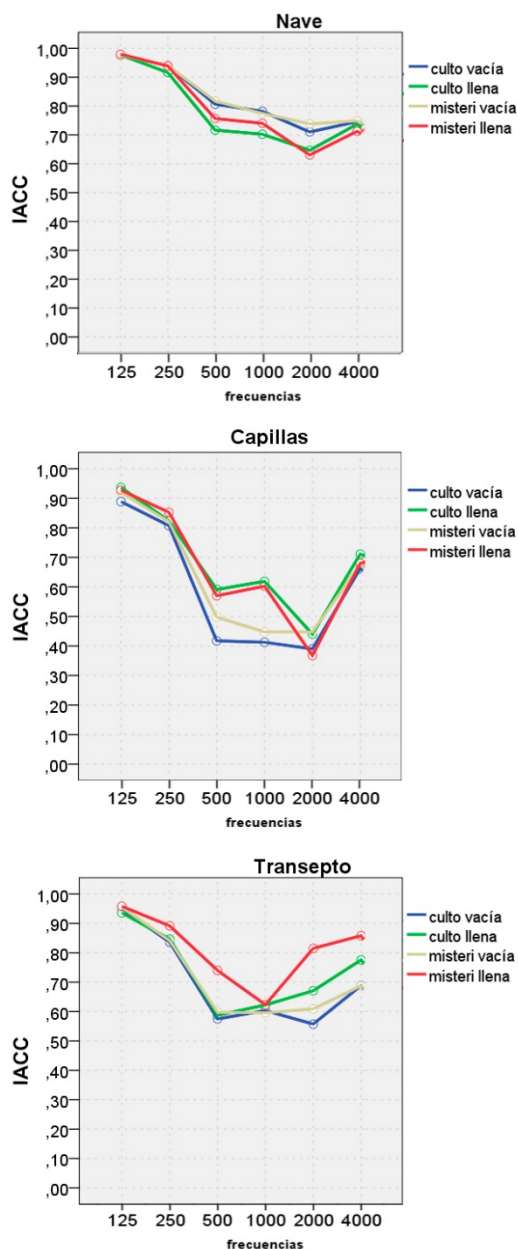


Figura IV.2.3.33. Valores medios de IACCA simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

Las figuras IV.2.3.34 y IV.2.3.35 muestran los resultados del parámetro LF por puntos, de las simulaciones realizadas para los dos usos estudiados con presencia de público y sin ella por frecuencias.

Para el uso de culto, las líneas se solapan, por lo que se puede afirmar que no existen diferencias.

En el caso de la representación la presencia del público provoca una disminución de los valores de LF y elimina las diferencias existentes entre los puntos centrales y los laterales en las filas intermedias y traseras, sobre todo a frecuencias medias-bajas. Destacan las diferencias en los puntos situados en el transepto y primera fila de la nave.

La tabla IV.2.3.30 recoge los valores medios de sala por frecuencias en cada caso y las diferencias entre ellos. Las diferencias son despreciables ya que no superan el valor de 0,02.

No existe diferencia estadísticamente significativa en ningún caso.

En términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para ningún uso.

A título ilustrativo, se comparan los resultados por zonas en la figura IV.2.3.36. Al igual que en el caso anterior el comportamiento es diferente en unas zonas y en otras. En la nave no se aprecian apenas diferencias para ningún uso y los valores son considerablemente inferiores a las otras dos zonas. En las capillas, el público afecta de manera diferente según el uso. Así, se observa que la diferencia entre lleno y vacío es mucho mayor en la configuración para el culto, aumentando disminuyendo los valores de LF con el llenado en ambos casos. A 2000 Hz se produce un efecto extraño aumentando mucho el valor de LF con la Basílica llena para el caso de la representación.

En la zona del transepto, ocurre algo similar. Los valores de LF disminuyen con el llenado pero lo hacen en mayor medida para la representación teatral. De nuevo, se produce un incremento inusual del valor de LF a 1000Hz para la Basílica llena con el Misteri.

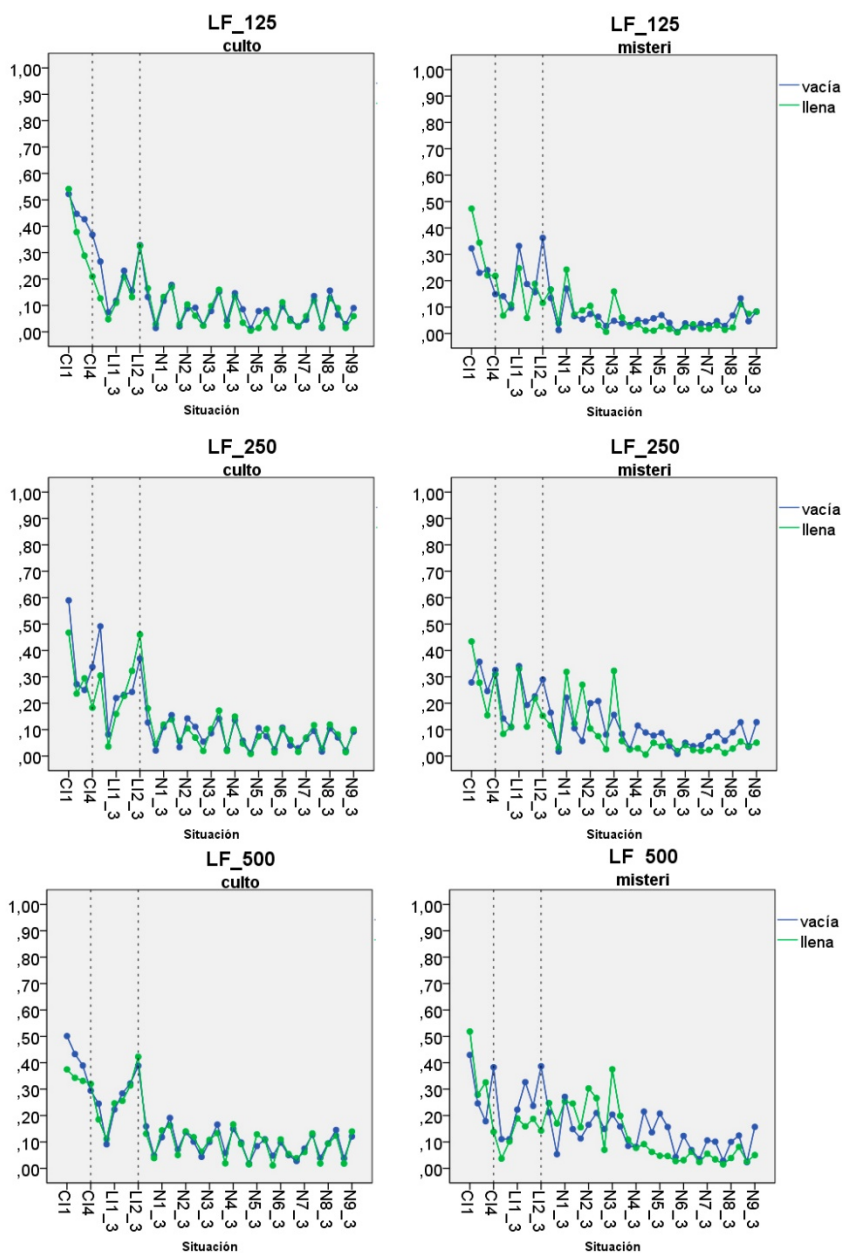


Figura IV.2.3.34. Valores de LF simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.

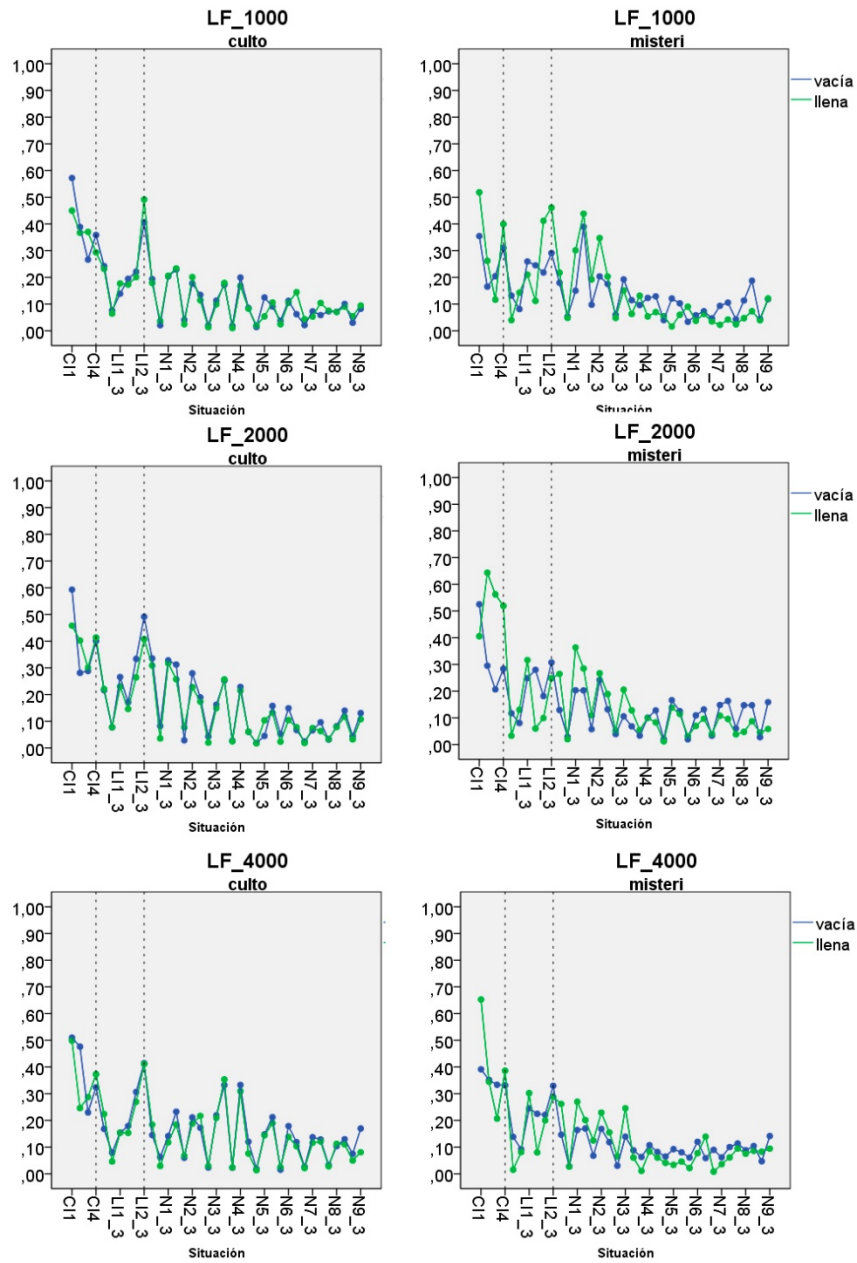


Figura IV.2.3.35. Valores de LF simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.

Tabla IV.2.3.35. Comparación de los valores medios de LF simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.

Variable dependiente			Media	Error estándar	Diferencia vacía-llena	p-valor	Dif. JND
LF_125	culto	vacía	0,135	0,014	0,019	0,094	0,38
		llena	0,116	0,014			
	misteri	vacía	0,101	0,014	0,004	0,432	0,09
		llena	0,097	0,020			
LF_250	culto	vacía	0,139	0,015	0,009	0,826	0,17
		llena	0,130	0,015			
	misteri	vacía	0,134	0,015	0,022	0,490	0,43
		llena	0,113	0,021			
LF_500	culto	vacía	0,154	0,015	0,010	0,594	0,20
		llena	0,144	0,015			
	misteri	vacía	0,165	0,015	0,023	0,936	0,47
		llena	0,142	0,021			
LF_1000	culto	vacía	0,147	0,015	0,000	0,981	0,01
		llena	0,146	0,015			
	misteri	vacía	0,146	0,015	-0,007	0,792	0,14
		llena	0,153	0,022			
LF_2000	culto	vacía	0,177	0,017	0,014	0,209	0,28
		llena	0,163	0,017			
	misteri	vacía	0,147	0,017	-0,018	0,932	0,36
		llena	0,165	0,024			
LF_4000	culto	vacía	0,173	0,015	0,014	0,141	0,27
		llena	0,160	0,015			
	misteri	vacía	0,142	0,015	0,000	0,492	0,00
		llena	0,142	0,021			

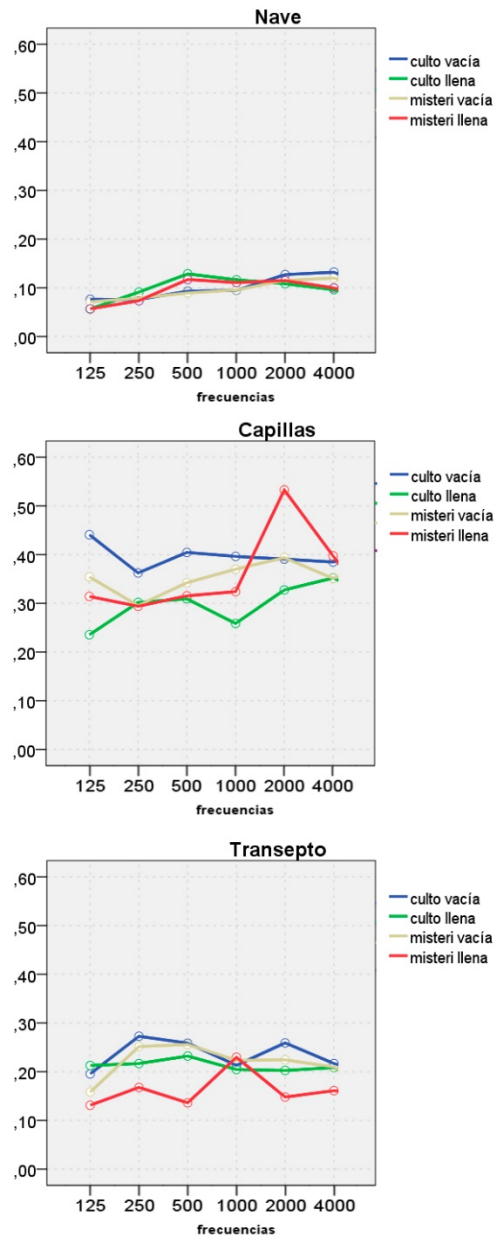


Figura IV.2.3.36. Valores medios de LF simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).

IV.2.3.4. Conclusiones

Se han estudiado las diferencias entre la configuración propia del culto y la de la representación del Misteri, analizando a partir de las medidas como afectan los cambios espaciales, y empleando las simulaciones previamente validadas para establecer la influencia del público. El análisis llevado a cabo demuestra que la basílica tiene un comportamiento acústico diferente cuando se prepara para el culto del que tiene durante la representación teatral y que las diferencias no afectan de igual manera a cada grupo de parámetros.

Los parámetros siguen la misma tendencia en los dos casos, con tiempos en torno a un segundo inferiores para la configuración del Misteri. Las diferencias debidas a los cambios espaciales son perceptibles a todas las frecuencias.

En el caso de los parámetros energéticos, aunque la tendencia es similar, la configuración de culto presenta mayores variaciones entre unos puntos y otros tanto en los parámetros de claridad como en la fuerza. No obstante, en términos de percepción son numerosos los casos en los que se puede considerar que no existen diferencias.

En cuanto a la inteligibilidad, el comportamiento es prácticamente el mismo en ambas configuraciones, siendo imperceptibles las diferencias existentes.

Por último, la influencia de los cambios espaciales sobre los parámetros de espacialidad depende del caso, siendo imperceptible para el IACC pero existiendo en el caso del LF tanto para la zona de la nave como del transepto.

Al evaluar ambas configuraciones mediante índices sintéticos, se observan las mayores diferencias entre los índices relativos de los parámetros C50 y C80 encontrándose en torno al 15%. No obstante, al comparar los índices globales las diferencias no superan el 2%.

Respecto a la influencia de la audiencia, como era de esperar, es mucho mayor en el caso del Misteri para los parámetros de reverberación dada la gran cantidad de público.

No ocurre lo mismo con los parámetros energéticos en los que, a pesar de ser perceptibles en algunos casos las diferencias son pequeñas.

En cuanto a la inteligibilidad, las diferencias son mucho mayores para el caso del Misteri pudiendo considerarse que no existe diferencia para la configuración propia del culto.

Por último, en lo relativo a los parámetros de espacialidad, en términos de percepción no existen diferencias entre la Basílica llena y vacía para ningún uso.

IV.2.4.

**Estudio de absorción
acústica in situ**

IV.2.4.1. Importancia de la medición in-situ de los coeficientes de absorción en edificios históricos.

Los coeficientes de absorción son un elemento fundamental en el estudio acústico mediante modelos virtuales. Existen catálogos normalizados que recogen materiales ensayados en laboratorio y sus correspondientes coeficientes de absorción. Sin embargo, los materiales que habitualmente componen los edificios históricos, como el que es objeto de esta tesis, no se encuentran en dichos catálogos. Además, dada su antigüedad, los materiales pueden haber sufrido transformaciones con el paso del tiempo modificando sus propiedades. Por este motivo, la posibilidad de medir in-situ las absorciones adquiere especial interés en este tipo de construcciones.

Como parte de la investigación, se ha realizado un trabajo de medición in-situ de los coeficientes de absorción de la piedra caliza que compone los muros, pilares y bóvedas de la Basílica y el mármol del pavimento, por tratarse de los materiales predominantes.

IV.2.4.2. Equipos e instrumentación de medida

Se ha utilizado un medidor de absorción acústica mediante sensores de presión y velocidad de Microflown. El equipo cuenta con una fuente esférica y una sonda encapsulada que contiene los sensores, separadas entre sí unos 2-3 centímetros, tal y como muestra la figura IV.2.4.1. Ambas están conectadas a un acondicionador de señal y un amplificador de la tarjeta de sonido, a su vez conectados entre sí y a un ordenador. La sonda se coloca a unos 5 mm de la superficie del material en posición perpendicular a ella y totalmente estática, se emite energía que incide sobre la muestra a medir y, en función de las señales de presión y velocidad recibidas por los sensores, el equipo lleva asociado un programa informático que proporciona los coeficientes de absorción por frecuencias (Microflown Technologies 2013; Mingliang et al., 2015).



Figura IV.2.4.1. Pistola de impedancia de Microflown, que incluye la fuente de emisión y sonda con sensores de presión y velocidad.

IV.2.4.3. Ensayos en laboratorio

Dado que el sistema de medición in situ empleado se encuentra todavía en fase experimental, se ha realizado un estudio experimental previo en el laboratorio, con el fin de elaborar un protocolo de medida fiable, antes de desplazarse a las salas. Este estudio ha consistido por una parte en comparar los resultados obtenidos con los ensayos normalizados, y por otra, en analizar la influencia de diferentes variables en los coeficientes de absorción medidos (Pérez et al., 2013).

Se han ensayado muestras de los siguientes materiales:

- Alfombra sintética de baja absorción sobre soporte de caucho.
- Placa de aluminio.
- Placa de aluminio barnizado.
- Pared de ladrillo con enlucido de yeso.
- Puerta de madera.
- Suelo de terrazo.
- Vinilo.
- Espuma de baja absorción.
- Lana de poliéster reciclado.

La figura IV.2.4.2 muestra el proceso de toma de medidas en diferentes materiales. En el caso de la lana de poliéster reciclado se han empleado tres muestras con diferente densidad y espesor. Cada muestra se ha identificado con 2 números. El primero indica su densidad en g/m^3 , y el segundo indica su espesor en mm.

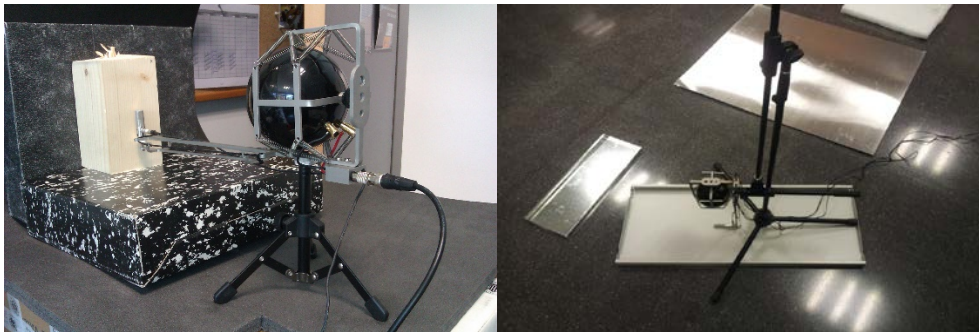


Figura IV.2.4.2. Medidas de absorción in situ realizadas en el laboratorio.

IV.2.4.3.1. Validación del sistema de medida

La comparación del sistema de medida in situ con ensayos normalizados para su validación se ha realizado empleando dos muestras de lana de poliéster reciclado con diferente espesor y densidad. En el primer caso se ha utilizado una muestra de 40 mm de espesor con una densidad de $1440\text{g}/\text{cm}^3$. En el segundo, una muestra de 50 mm de espesor y una densidad de $500\text{g}/\text{cm}^3$.

Los coeficientes de absorción obtenidos con la sonda de impedancia se han comparado con ensayos realizados en cámara reverberante y tubo de Kundt. La figura IV.2.4.3 muestra los resultados.

Como se observa en la imagen, los valores obtenidos con el método propuesto de medición in situ (representados en color azul) quedan englobados entre los obtenidos por los ensayos normalizados para frecuencias bajas y medias, y sólo se observa una diferencia sustancial en frecuencias altas, a partir de 4000 Hz.

De los resultados se deduce que para un mismo material y frecuencia se pueden obtener valores de absorción diferentes en función del método de ensayo empleado. De ahí la importancia de analizar cómo influyen en los coeficientes de absorción las diversas variables que intervienen en el proceso de medida.

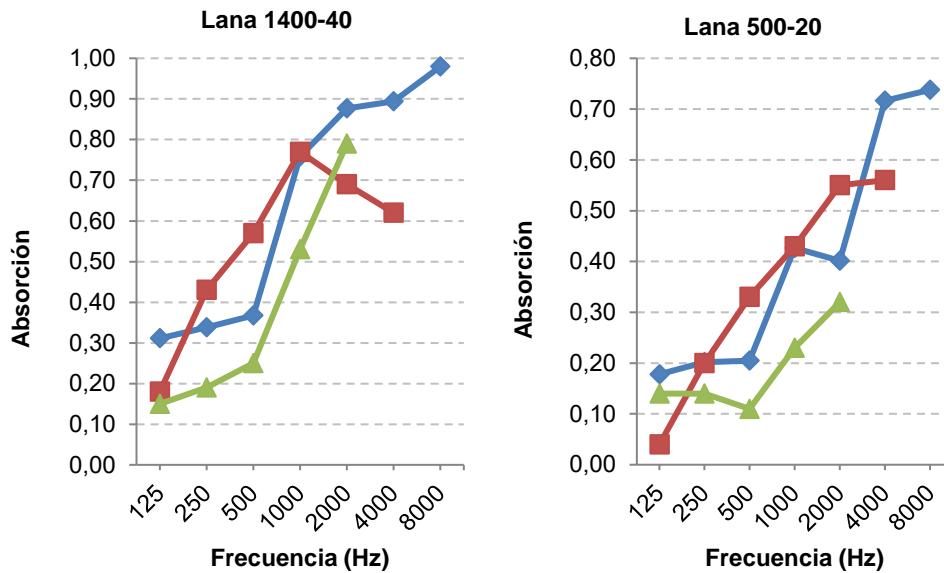


Figura IV.2.4.3. Comparación de los valores de la absorción de dos muestras de lana de poliéster reciclado de distinta densidad y grosor. a) 1440 g/cm³ y 40 mm de espesor y b) 500 gr/cm³ y 20 mm de espesor), para los tres métodos de medida considerados. En azul, P-U: método propuesto en este trabajo; en rojo, cámara reverberante; y en verde, tubo de Kundt.

IV.2.4.3.2. Repetibilidad

La repetibilidad es un factor imprescindible para comprobar el correcto funcionamiento de un equipo de medida. Por ello se ha estudiado que bajo unas mismas condiciones, los resultados son los mismos. Para ello se ha repetido cada medida tres veces y se ha calculado la desviación típica. En casi todos los casos se obtuvieron valores inferiores a 0,01. La tabla IV.2.4.1 muestra los resultados para los materiales y frecuencias en los que se ha superado dicho valor. El estudio se ha realizado para la totalidad de los materiales indicados anteriormente en las bandas de frecuencia comprendidas entre 125 y 8000 Hz.

De los datos obtenidos se deduce que la repetibilidad del método es excelente, sobre todo a frecuencias medias.

Tabla IV.2.4.1. Valores de los materiales y frecuencias para los que la desviación típica resultó igual o superior a 0,01.

Frecuencia	Onda Sweep			Ruido blanco	
	Aluminio	Pared	Madera	600-40	Madera
125		0,01	0,05	0,01	0,24
250			0,02		0,01
500					0,01
8000	0,01		0,01		0,01

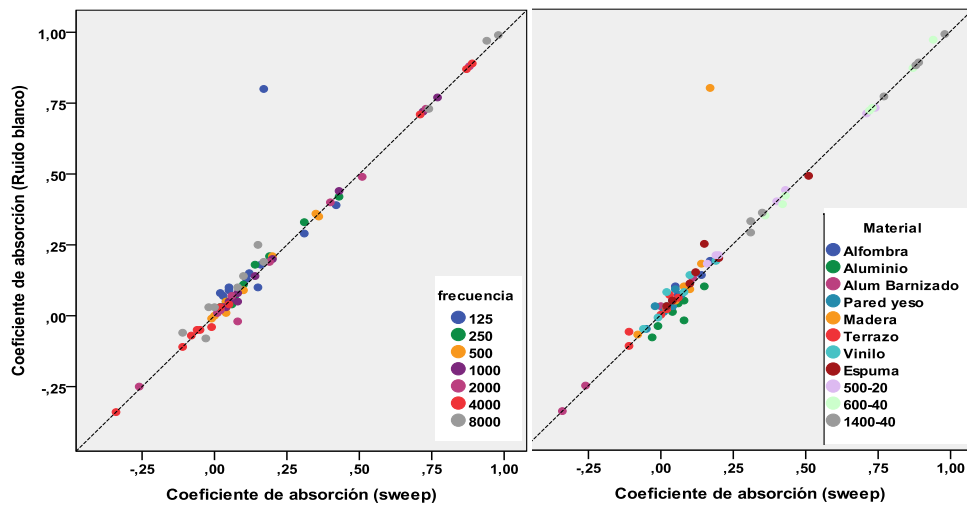


Figura IV.2.4.4. Análisis de la concordancia entre los valores del coeficiente de absorción obtenido con ruido blanco y sweep mostrando en el gráfico de la izquierda los resultados según la frecuencia y en el de la derecha según el material.

IV.2.4.3.3. Variables que influyen en los coeficientes de absorción

IV.2.4.3.3.1. Tipo de señal

Para cada material se han determinado los coeficientes de absorción utilizando dos tipos de señales de emisión: onda sweep y ruido blanco. El coeficiente de correlación interclase (alfa de Crombach=0.983) muestra la alta concordancia entre los resultados obtenidos con ambos métodos.

Se ha querido comprobar si existían materiales o frecuencias para los que esta correlación era menor. La figura IV.2.4.4 muestra el gráfico de regresión de los valores obtenidos con la señal de ruido blanco en función de los obtenidos con la señal sweep. Los coeficientes de la regresión de la recta ajustada, recogidos en la tabla IV.2.4.2, muestran que no existe error sistemático entre los valores obtenidos con uno u otro tipo de señal (IC95% de la ordenada en el origen contiene el 0) y la proporcionalidad se mantiene (IC95% de la pendientes contiene el 1), pero se observa que las bajas y altas frecuencias quedan ligeramente más alejadas de la bisectriz de la gráfica.

Tabla IV.2.4.2. Valores de los parámetros de la regresión de los valores del coeficiente de absorción determinados con la señal ruido blanco o sweep.

	Valor	Error	r-Pearson	IC95%	IC 95%
Ord. origen	0,014	0,010	0,966	-0,006	0,035
Pendiente	0,992	0,030		0,932	1,053

Por ello se ha calculado la discrepancia entre los valores obtenidos con los dos tipos de señal. Los resultados se muestran en la figura IV.2.4.5.

Como se observa, las menores discrepancias se encuentran a frecuencias medias, aumentando en general para las bandas de 125 y 8000 Hz. La madera, la alfombra, la es puma y el aluminio son los materiales que mayores discrepancias presentan.

Los resultados obtenidos parecen indicar que el tipo de señal empleado en la medición es indiferente, excepto en las bandas de frecuencia extremas. Sin embargo, los coeficientes proporcionados por el uso de la señal de tipo sweep

presentan una tendencia más próxima a los proporcionados por los ensayos normalizados que se emplean para la obtención de coeficientes de tablas y catálogos (Pérez, 2014).

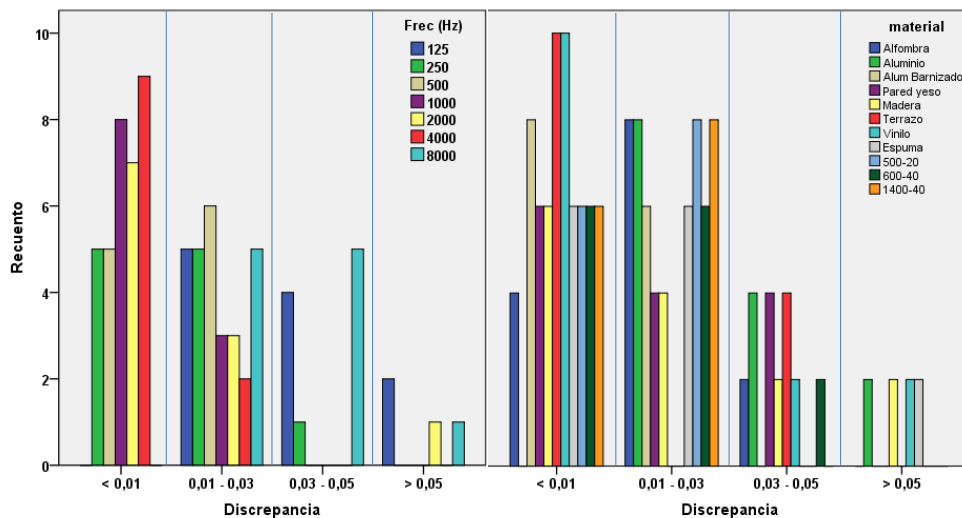


Figura IV.2.4.5. Discrepancia de los valores del coeficiente de absorción en función de la frecuencia y del material absorbente

IV.2.4.3.3.2. Tamaño de la muestra y efecto borde

La segunda variable que se ha estudiado ha sido el tamaño que debe tener la muestra de material y la influencia que tiene sobre los resultados de la medida la distancia a la que se coloca la sonda del borde de la muestra. Para ello se han empleado muestras de 50x50 cm y se han tomado varias medidas variando la distancia al borde. Los resultados se muestran en las figuras IV.2.4.6 y IV.2.4.7.

Los resultados muestran en los dos casos como al realizar la medición en puntos próximos al borde aparecen errores y se obtienen coeficientes de absorción negativos. En el caso del aluminio esto sucede también en las otras dos posiciones de medida a frecuencias altas pero el error es más acusado a medida que la sonda se aproxima al borde de la muestra. Se puede concluir, por tanto, que la posición del punto de medida y su cercanía al borde de la muestra resultan fundamentales para la fiabilidad de los resultados. Además, en algunos materiales reflectantes, el medidor proporciona valores negativos. Esta es una limitación que deberá tenerse en cuenta.

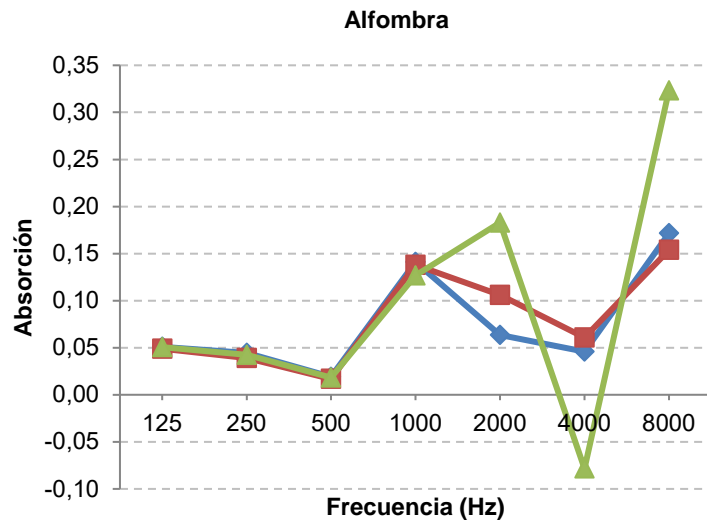


Figura IV.2.4.6. Ilustración 1 Influencia del tamaño de muestra en el material alfombra. En azul, centro de la muestra, en rojo, a 15 cm. del borde; y en verde, a 5 cm. del borde.

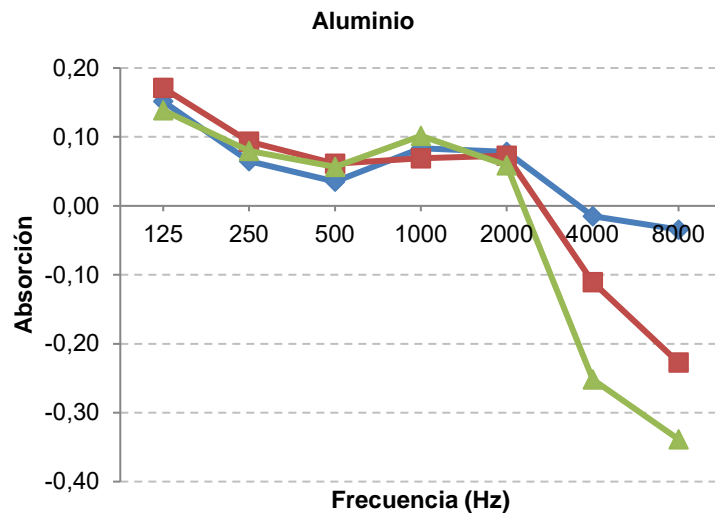


Figura IV.2.4.7. Ilustración 2 Influencia del tamaño de muestra en el material aluminio. En azul, centro de la muestra, en rojo, a 15 cm. del borde; y en verde, a 5 cm. del borde.

IV.2.4.3.3.3. Tipo de sistema absorbente

Se ha estudiado la influencia sobre los coeficientes de absorción medidos de una muestra que tiene otro material colocado debajo. Para ello, se han utilizado las tres muestras de lana de poliéster y se han medido colocando una espuma de baja absorción detrás de ellas y sin colocarla. Los resultados se muestran en la figura IV.2.4.8.

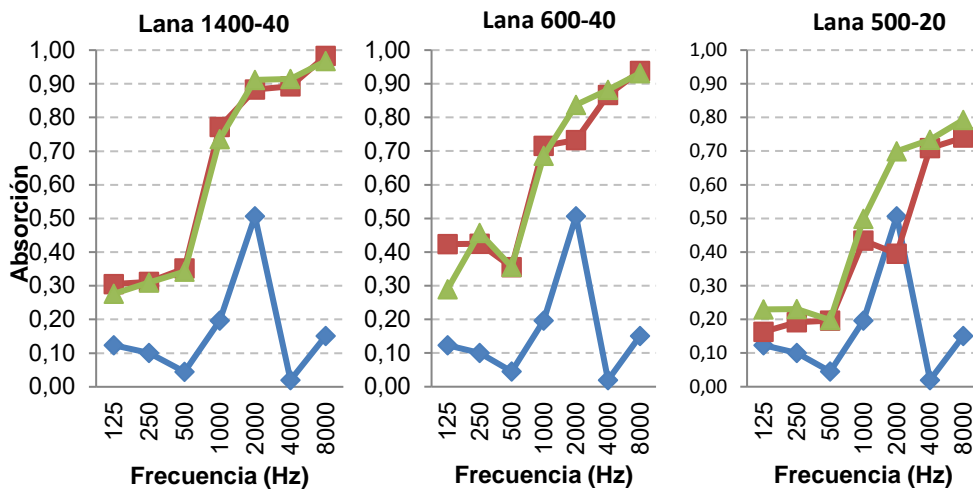


Figura IV.2.4.8. Influencia del sistema absorbente. Se muestra en azul la absorción de la espuma, en rojo la absorción de las muestras con espuma detrás y en verde la absorción de las muestras sin la espuma.

Como se puede observar, los valores que se obtienen son en general muy similares para cada frecuencia, independientemente de la muestra. No obstante, a 2000 Hz se aprecian diferencias. La muestra 1400-40, la más densa y gruesa, tiene unos valores muy parecidos, midiendo sin espuma y con espuma. Si observamos la muestra 600-40, vemos que a 2000 Hz. existe una diferencia mayor, de aproximadamente 10 centésimas. Y si por último analizamos la muestra 500-20, vemos que a 2.000 Hz. la diferencia es de aproximadamente 30 centésimas.

Por tanto, como es lógico, cuanto menos denso y más fino es el material, mayor es la influencia del material de soporte sobre el que se encuentra. Este ensayo demuestra la gran influencia que pueden tener en el resultado final las capas que haya tras el material que midamos. Por tanto, a la hora de medir se deberá tener en cuenta la composición del elemento y si está formado por varias capas.

IV.2.4.3.3.4. Influencia del elemento no visible

Por último, se ha querido analizar la influencia que pueden tener en la absorción acústica los elementos que se encuentran detrás de la envolvente de una sala y que no son visibles desde su interior. Para ello, se ha trabajado con una cámara termográfica en el Paraninfo de la Universitat Politècnica de València.

La cámara termográfica muestra las diferentes emisiones de temperatura que existen en una superficie permitiendo conocer su composición y mostrando las irregularidades que existen en la misma que no son apreciables a simple vista.

La figura IV.2.4.9 muestra la imagen tomada en una de las paredes del Paraninfo, en ella se aprecia perfectamente tanto la composición del cerramiento, construido con fábrica de ladrillo aunque se encuentra revestido con paneles de madera, como la ubicación exacta de una canalización.

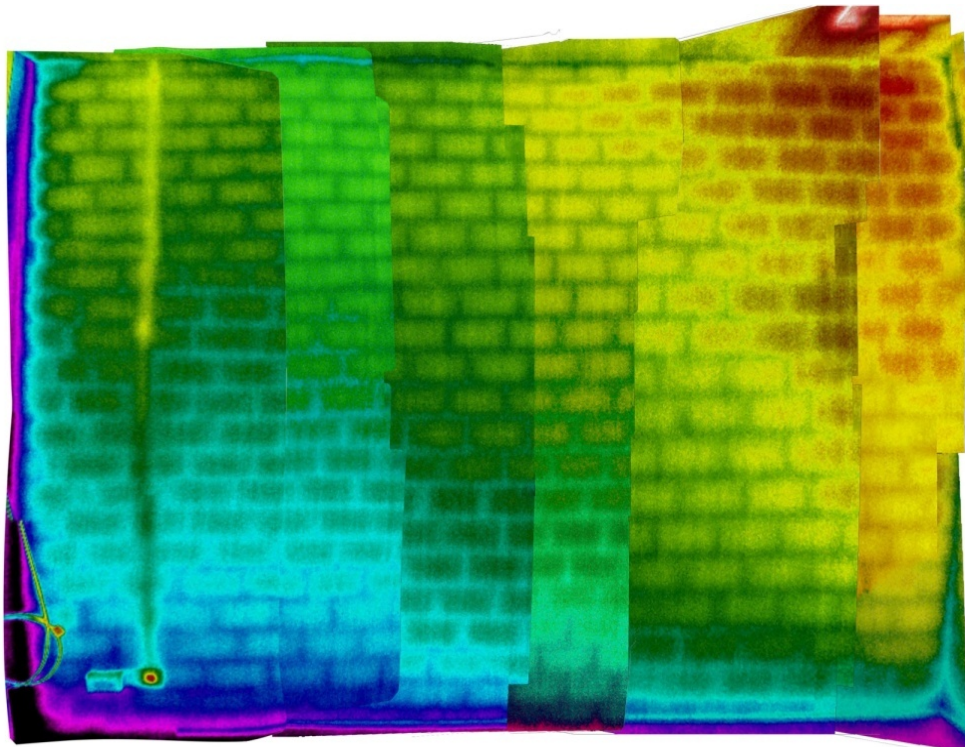


Figura IV.2.4.9. Termografía de una de las paredes del Paraninfo de la UPV.

Se han tomado medidas de absorción en la zona en la que se encuentra la canalización y en sus proximidades. Los resultados se muestran en la IV.2.4.10.

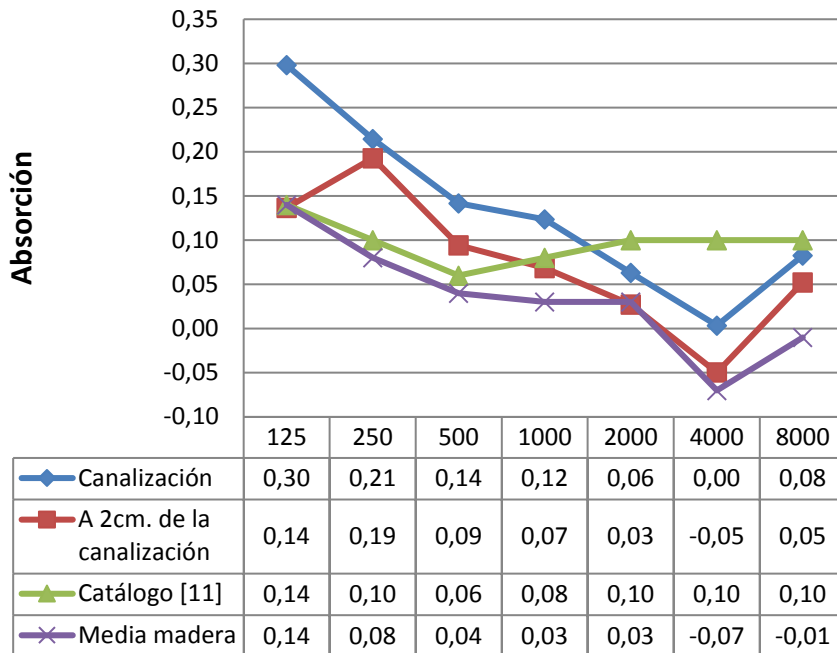


Figura IV.2.4.10. Influencia del elemento no visible. Resultados de las medidas de absorción in situ coincidiendo con una canalización en el cerramiento.

Se observa una diferencia de absorción en la zona en la que se encuentra la canalización que disminuye a medida que aumenta la distancia a ella. Se puede concluir que pueden existir irregularidades en las envolventes de las salas que no son visibles en la superficie pero pueden provocar variaciones en la absorción acústica.

En este sentido, resulta útil el empleo de una cámara termográfica para identificar las zonas que requieren de un estudio específico y deben ser medidas. Por otra parte, hay que tener en cuenta el tamaño de las mismas respecto al conjunto ya que en este caso concreto la superficie ocupada por la canalización es mínima en relación al conjunto de la pared por lo que la irregularidad podría despreciarse.

IV.2.4.4. Protocolo de medida

El estudio experimental explicado en el punto anterior ha permitido establecer un protocolo de uso del medidor. Antes de llevar a cabo las medidas se deben tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- El tamaño de la muestra debe ser preferiblemente de 30 x 30 cm como mínimo. Si esto no es posible, se procurará rodear la muestra con material absorbente para evitar reflexiones de materiales cercanos.
- El coeficiente de absorción obtenido de tener un valor entre 0,1 y 1. Pueden aparecer algunas interferencias en la medida en materiales muy reflectantes en frecuencias en las que la distancia sonda-material es similar a $\lambda/4$.
- Para la medida debe colocarse el micrófono perpendicular a la muestra. Se han hecho medidas a 45 grados y la absorción se aproxima a 1 prácticamente a todas las frecuencias.
- El margen de frecuencias para el que el equipo da resultados fiables es de 300 -2.000 Hz., a la espera de revisar artículos al respecto y comprobaciones.
- En materiales reflectantes es preferible medir con onda sweep.
- Los materiales muy reflectantes dan mucho error a frecuencias bajas. Los resultados que se obtuvieron fueron muy diferentes, puede que se deba a influencia del espacio en el que se ha medido y a que el laboratorio es más pequeño y pueden influir las superficies próximas.
- Para materiales reflectantes, en muchas ocasiones, el medidor proporciona absorciones negativas a altas frecuencias. En estos casos, se recomienda emplear el último valor positivo obtenido en el espectro de frecuencias.
- Se debe cuidar al máximo la colocación del aparato al tomar la medida, cualquier movimiento provoca errores.
- La coherencia deber ser siempre próxima a 1, si no es así los resultados no son válidos.

Una vez establecidos las posiciones de registro y tras haber conectado y encendido los equipos se inicia el programa informático. Una vez configurados los ajustes se procede a la calibración del medidor para tener en cuenta la influencia del entorno. La calibración consiste en la emisión de la señal en campo libre, alejándola de cualquier superficie, puede repetirse las veces que sea necesario para ajustar el volumen de emisión de forma que el nivel sea suficiente pero no saturar. Posteriormente se calibra el DAQ, aparato que funciona como tarjeta de sonido y que dispone de dos canales de entrada correspondientes a las dos señales de presión y velocidad, y una vez comprobada que la señal de calibración es correcta y se calibra el entorno mediante la emisión de nuevo en campo libre. Se debe comprobar que el gráfico correspondiente a la coherencia muestra un valor próximo a 1 para todo el rango de frecuencias y que la fase de impedancia no presenta cambios muy bruscos. La figura IV.2.4.11 muestra la pantalla de calibración.

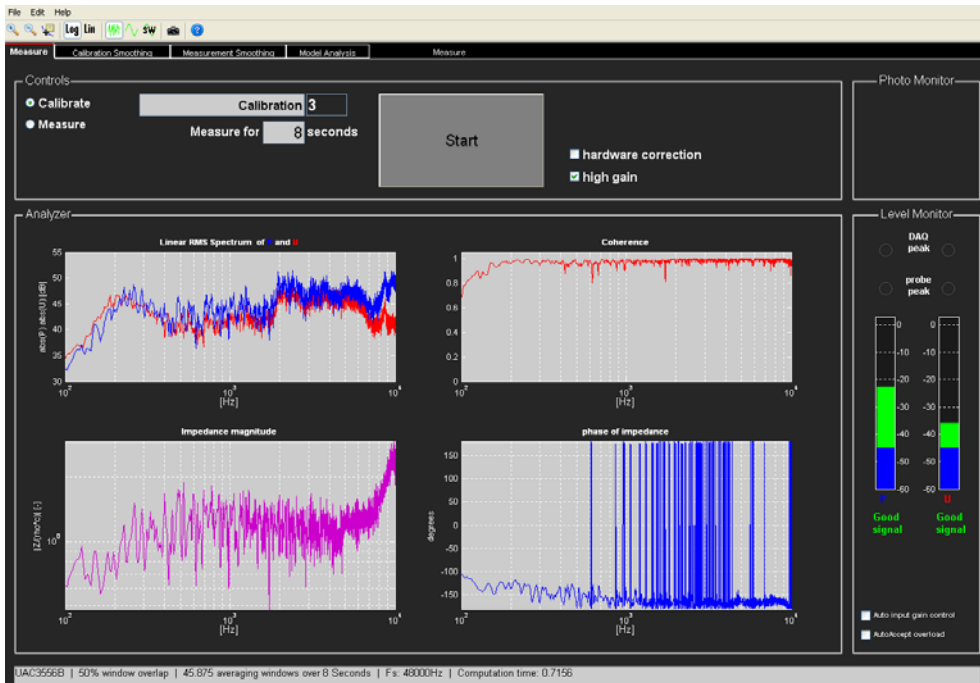


Figura IV.2.4.11. Pantalla de calibración.

Finalizada la calibración de los equipos se procede a la medición. El equipo dispone de diferentes tipos de señal, deberá utilizarse la misma para la calibración y las medidas, en este caso se ha empleado la onda sweep ya que en los ensayos previos se obtuvieron mejores resultados. Se coloca la pistola perpendicular a la superficie del material de forma que la sonda quede a unos 5 mm del mismo y se procede a la emisión. Al igual que en la calibración se debe comprobar que el gráfico correspondiente a la coherencia mantiene un valor igual o próximo a 1 en todas las frecuencias.

Se ha repetido cada medida tres veces, cuidando que la distancia de la sonda al borde extremo de la muestra fuera de al menos 15 cm para minimizar el “efecto borde” detectado durante el estudio experimental previo.

Una vez finalizadas las medidas y ya en el laboratorio se ha procedido a procesar los datos recogidos. El programa informático dispone de tres pestañas para realizar este proceso, en la primera ha de cargarse el archivo de calibración y seleccionarse el método de ajuste, en la segunda se selecciona el archivo de medida y nuevamente el modelo de ajuste y en la tercera se muestran los resultados en función del modelo de impedancia elegido. La figura IV.2.4.12

muestra la pantalla de resultados y la curva de valores de absorción que proporciona el programa.

Terminado el proceso se han exportado los coeficientes de absorción por bandas de octava, para las frecuencias comprendidas entre 125 y 4000 Hz. Los resultados se incluyen en el anexo 3.

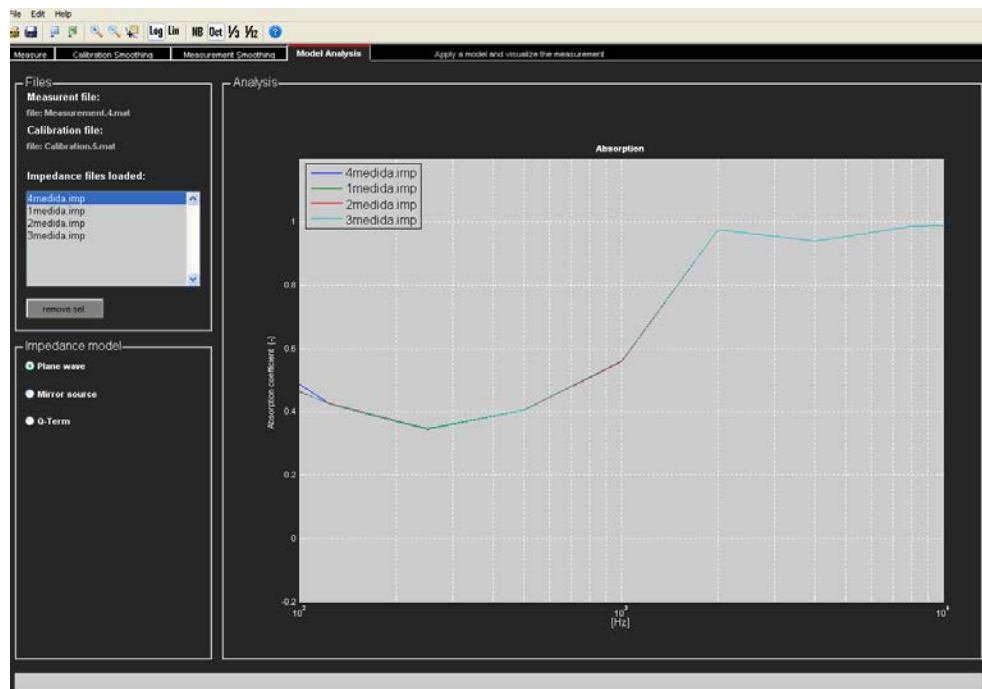


Figura IV.2.4.12. Pantalla de resultados. El software proporciona la curva de valores de absorción por frecuencias.

IV.2.4.5. Medidas en la Basílica de Santa María

Una vez elaborado y contrastado el protocolo de medición in situ, se ha realizado un estudio de absorción en la Basílica de Santa María con el fin de determinar los coeficientes de absorción de los materiales predominantes, en este caso la piedra y el mármol del suelo, y compararlos con los valores empleados en la simulación, ya que, como se ha comentado al inicio de este capítulo, no existen bases de datos que incluyan los coeficientes de absorción de este tipo de materiales y el paso del tiempo puede haber producido cambios en los mismos.

IV.2.4.5.1. Posiciones registradas

Se han tomado medidas en un total de 30 posiciones, distribuidas según muestra la figura IV.2.4.13. Como se puede observar, la mayoría de las medidas se han realizado en los sillares de piedra por ser el material preponderante y aquel del que no se tiene ningún dato de referencia. A la hora de seleccionar los puntos de medida, se ha procurado realizar un muestreo que recogiera tanto los diferentes tipos de fábrica, distinguiendo entre los sillares que componen el zócalo de los de la parte superior de los muros, como los elementos constructivos en los que se sitúan, diferenciando muros y pilares, con el fin de incluir todas las posibles variantes y establecer posibles diferencias de cara a un estudio más exhaustivo. Por otra parte, se realizó una inspección mediante cámara termográfica para identificar posibles irregularidades, pero no se encontraron.

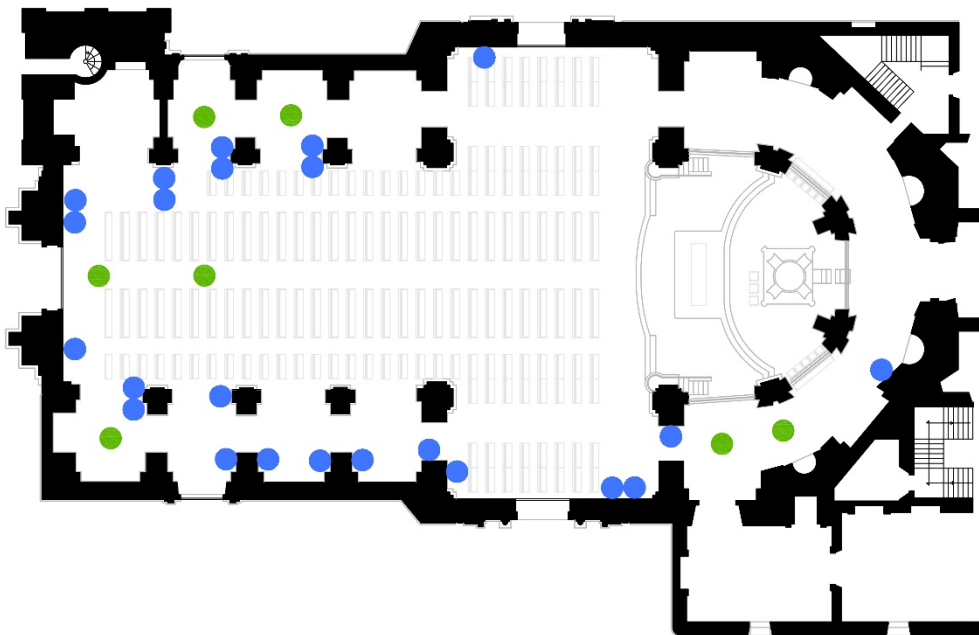


Figura IV.2.4.13. Posiciones de registro de las medidas de absorción in-situ. Se muestran en verde las medidas tomadas en el mármol del pavimento y el azul las tomadas en las paredes de piedra.

El caso del mármol es diferente, ya que sí se incluyen coeficientes de absorción de este material en los catálogos. No obstante, se han querido contrastar los datos normalizados. La figura IV.2.4.14 muestra dos imágenes del proceso de medición in situ en la piedra y el pavimento.



Figura IV.2.4.14. Campaña de medidas de absorción in situ

IV.2.4.5.2. Resultados obtenidos

La figura IV.2.4.15 muestra los coeficientes de absorción obtenidos a partir de la medición in situ de la piedra y el mármol del pavimento por frecuencias. Siguiendo el protocolo establecido, se realizaron tres medidas en cada punto que se han representado en la imagen en diferentes colores. Se ha comprobado que, como se concluyó en las pruebas de laboratorio, la repetibilidad del método es muy buena y los resultados a frecuencias altas no son fiables ya que se obtienen coeficientes de absorción negativos.

Si analizamos cada material por separado, se observa que los resultados de las medidas en la piedra presentan gran variabilidad, con valores que van desde absorciones casi nulas a coeficientes de 0,4 para las frecuencias bajas y 0,2 en las medias. Estas diferencias tan importantes entre unos valores y otros pueden ser debidas a que la piedra, al ser un material natural, presenta una gran heterogeneidad. Además el paso del tiempo puede haber producido diferente grado de desgaste según su ubicación.

En el caso del mármol del pavimento, la variabilidad de los resultados es menor con coeficientes de absorción de 0,15-0,20 a frecuencias bajas y 0,1-0,15 a frecuencias medias. En este caso, llama la atención la alta absorción obtenida en relación a los coeficientes normalizados que se le asignan al mármol que son del orden de 0,01-0,02.

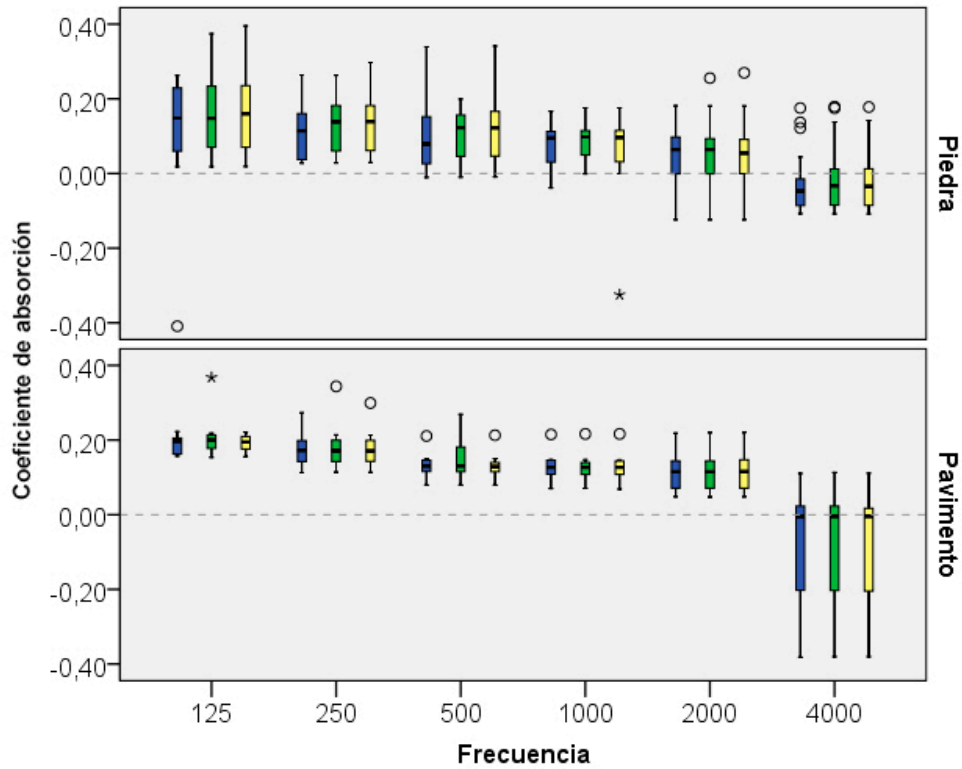


Figura IV.2.4.15. Resultados de las medidas de absorción in situ para los dos materiales predominantes en la Basílica por bandas de frecuencia. Para cada banda de frecuencia se muestran por separado los resultados de las tres medidas repetidas.

Si se comparan los valores medios de absorción obtenidos mediante medidas in situ, con los empleados en la simulación, se observa que son considerablemente más elevados, tal y como muestra la figura IV.2.4.16.

Se ha realizado una estimación del tiempo de reverberación que resultaría al emplear los coeficientes de absorción medios medidos, obteniendo valores de alrededor de 4 segundos para todas las frecuencias. Tiempos de reverberación que son muy inferiores a los medidos, tal y como se muestra en la figura IV.2.4.17.

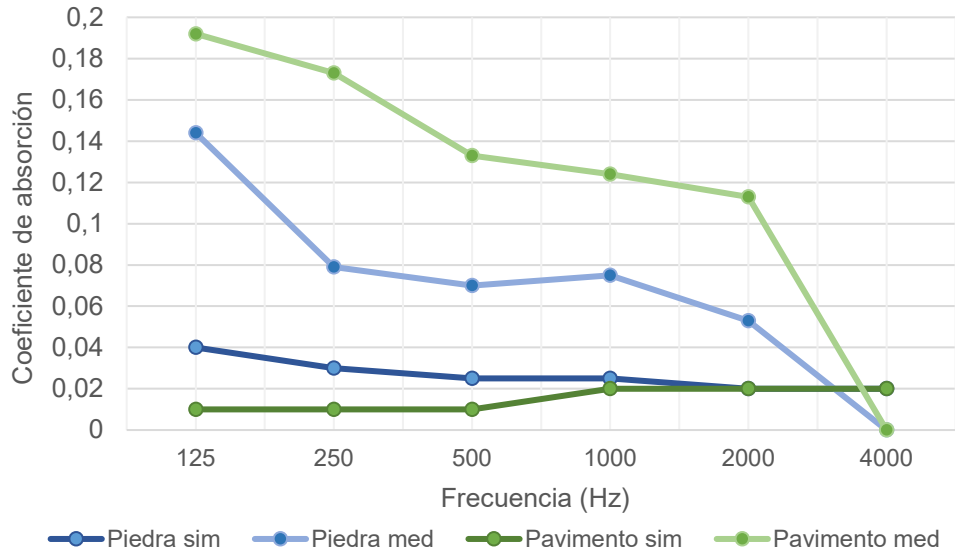


Figura IV.2.4.16. Valores medios de los coeficientes de absorción medidos y los empleados en la calibración del modelo y posterior simulación para la piedra de las paredes y el mármol del pavimento, para cada banda de frecuencias.

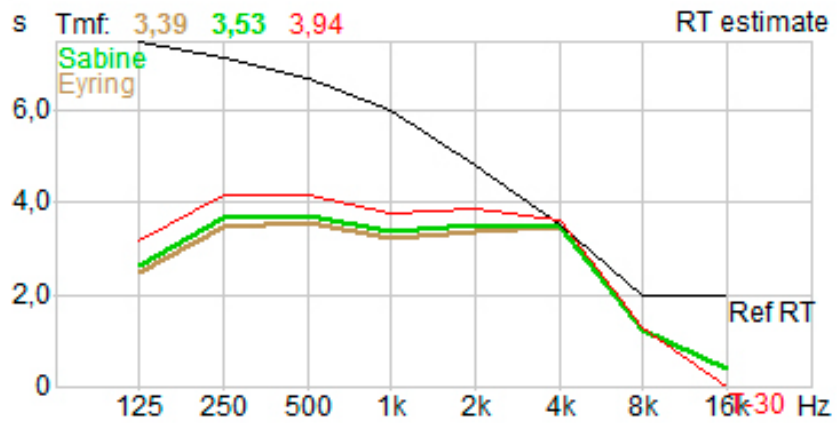


Figura IV.2.4.17. Comparación del tiempo de reverberación medido (en negro) con la estimación del tiempo de reverberación que se obtendría al simular empleando los valores medios de absorción obtenidos in situ (en rojo). Se muestran también los valores teóricos según las fórmulas de Sabine y Eyring. Fuente: CATT Acoustics.

IV.2.4.6. Conclusiones

A pesar de haber comprobado la validez del método de medición de absorciones in situ mediante sensores de presión y velocidad, los resultados obtenidos en este primer análisis muestran la necesidad de realizar un estudio mucho más exhaustivo de las propiedades de absorción acústica de los materiales de la Basílica.

En el caso de la piedra, la heterogeneidad del material y la alta variabilidad de las absorciones medidas hace imposible el uso de valores medios globales para el conjunto de los elementos constructivos compuestos por este material, por lo que será necesario buscar una clasificación por zonas que muestren comportamientos similares.

En el caso del mármol del pavimento, la variación es menor. No obstante, se han obtenido valores de absorción considerablemente elevados que difieren mucho de los recogidos en catálogos por lo que se deberá ampliar el muestreo a modo de comprobación.

IV.3.

Virtualización

IV.3.1 Virtualización en patrimonio

La aplicación de las nuevas tecnologías en el patrimonio cultural es una práctica cada vez más extendida. La construcción de modelos virtuales permite reproducir los bienes para su estudio, evitando la intervención directa sobre los mismos y favoreciendo su conservación. Tras una toma de datos en el elemento real se construye y calibra una maqueta del mismo en el que es posible recrear tantas veces como se desee el entorno y simular sus comportamientos en necesidad de desplazarse nuevamente a él.

Además, la versatilidad del modelo virtual es mucho mayor que la del elemento real ya que se puede actuar sobre él con total libertad y sin limitaciones de equipos, personales u otras causas externas, permitiendo incluso simular situaciones que en la realidad no se podrían producir. Esto resulta especialmente útil cuando se trabaja con edificios protegidos con valor patrimonial, en los que la capacidad de actuación está acotada.

Por otra parte, el lenguaje audiovisual supone una herramienta de difusión muy potente, que permite fomentar el conocimiento y el acercamiento de los bienes patrimoniales a cualquier tipo de población.

En el caso que nos ocupa, la reproducción virtual de un espacio a través de un modelo tridimensional permite no sólo la percepción visual y sonora de un espacio sino evaluar los parámetros objetivos y subjetivos de la calidad acústica del mismo.

IV.3.2 Modelado y texturización de la Basílica de Santa María de Elche

Con el fin de realizar una simulación gráfica de la Basílica de Santa María y lograr un entorno lo más inmersivo posible para las auralizaciones, se ha construido una maqueta virtual detallada del interior del edificio utilizando el software AutoCAD. El modelo final es el resultado de un trabajo previo de investigación que se describe en el apartado IV.1 de esta tesis.

Para simular un entorno tridimensional en AutoCAD, es posible trabajar tanto con sólidos, objetos que el propio programa reconoce como volumétricos, como con superficies u otro tipo de objetos planos o bidimensionales que definan la envolvente del volumen. A efectos del realismo del modelo, dicha distinción es irrelevante, siempre y cuando el espectador se desplace, una vez finalizado el modelo tridimensional, dentro de los límites establecidos por dicha envolvente bidimensional. AutoCAD permite ajustar con gran exactitud los vértices de los objetos para que no existan huecos, pero es importante construir el modelo considerando cómo se le van a acoplar las texturas posteriormente.

Además de los elementos constructivos que constituyen la envolvente, se han modelado algunos objetos importantes para la percepción del espacio como los bancos, los púlpitos y el tabernáculo. Otros, sin embargo, se han representado como simples planos, dándose realismo posteriormente mediante el tratamiento de las imágenes y texturas asignadas, tal es el caso de las barandillas de los balcones y las rejas metálicas que rodean el ábside.

El modelo se ha exportado al programa 3ds Max para asignarle las texturas correspondientes a los diferentes materiales que componen el espacio, y otorgarle una iluminación adecuada que permita reproducir con la mayor fidelidad y realismo posible el interior de la Basílica.

El programa de modelado 3ds Max (Murdock, 2009) es una herramienta muy potente para la construcción y simulación de edificios de forma virtual. Permite aplicar a los elementos texturas elaboradas a partir de imágenes de los propios edificios. Además, dispone de diversos modificadores para acoplar las texturas según el elemento sea plano, circular, paralelepípedo, o incluso permite ajustar la textura punto por punto sobre el objeto deseado, cuando la geometría es más compleja. Entre sus opciones permite también la aplicación de efectos de relieve y rugosidad para aproximar las texturas a su apariencia real. Además, una de las mayores ventajas que ofrece 3ds Max es la utilización de combinaciones de luces de diversos tipos, de forma que es posible imitar tanto la luz natural del sol como la artificial, logrando efectos muy realistas. Cabe destacar que 3ds Max es un entorno de modelización donde se prioriza el efecto final visual de los modelos. Está enfocado hacia la obtención de un efecto realista y permite crear animaciones (Cervera et al., 2012).

La aplicación de las texturas en los modelos visuales no es trivial. Se ha de tener determinada pericia en la aplicación de la iluminación a los modelos. Problema incrementado debido a la complejidad de espacios como la Basílica de Santa María.

La figura IV.3.1 muestra algunas de las texturas obtenidas a partir de fotografías tomadas en la basílica y trabajadas para poder asignarlas a los diferentes elementos constructivos que configuran el espacio. Se puede observar como para los elementos planos como los muros o el pavimento, es suficiente con transformar la imagen para obtener una textura plana, mientras que en otros casos es necesario que la textura adquiera la forma del elemento al que se le va a asignar. Las texturas planas presentan una dificultad añadida y deben tratarse para obtener la mayor homogeneidad posible, ya que el programa las asigna repitiéndolas a modo de mosaico hasta cubrir toda la superficie del elemento y las sombras o cambios de color existentes evidencian mucho esta repetición restando realismo.



Figura IV.3.1. Ejemplos de texturas empleadas en el modelo de la Basílica de Santa María.

Las mayores dificultades encontradas en el proceso han sido:

- En la toma de fotografías, dada la necesidad de un alto nivel de detalle, poca distorsión y un ajuste de luz y color adecuados, se ha detectado que en salas con iluminación pobre la toma de imágenes tiene mayor dificultad y, en algunos casos las fotografías contienen ruido y necesitan mayor procesado posterior. Se encuentran dificultades en el ajuste de color para que se reflejen fielmente el entorno y la iluminación de la sala. Además, es necesario evitar sombras o cambios de iluminación intensos para obtener una imagen limpia. Si esto no se consigue se debe dedicar un tiempo mayor en el retoque de la fotografía.

- En el procesado posterior resulta imprescindible la selección de fotografías adecuadas, con la consecuente disminución de material de trabajo, siendo necesario en cualquier caso, actuar sobre cada una de las fotografías para extraer las texturas (corrección de la perspectiva, igualar iluminación, corrección de tono).

- En la aplicación de las texturas sobre el modelo geométrico ha sido necesario realizar una reestructuración del modelo geométrico inicial, agrupando por materiales y separando zonas con diferente posicionamiento de textura (superficies con diferente orientación o diferente normal). En algunos casos, se han reconstruido partes de la geometría para permitir un mejor acoplamiento de las texturas. Por otra parte, es necesario realizar un segundo ajuste del color y el tono de las texturas, ya que el programa de renderización 3D modifica la percepción del color conseguida con el primer retoque de la imagen.

- En la iluminación de la sala, para crear el efecto deseado de luces y sombras, intervienen tanto la iluminación artificial de la sala (focos, lámparas, etc.) como la luz ambiental exterior y el modelado de ésta no es trivial. La experiencia del modelador es esencial para intuir la posición y tipos de luces necesarias para crear el ambiente correcto.

Tanto el adecuado tratamiento de las texturas para crear los materiales, como el tratamiento de la iluminación son indispensables para obtener un resultado realista, en las figuras IV.3.2, IV.3.3 y IV.3.4 se observa cómo ha ido evolucionando el modelo de la Basílica de Santa María con la aplicación de materiales y luces.

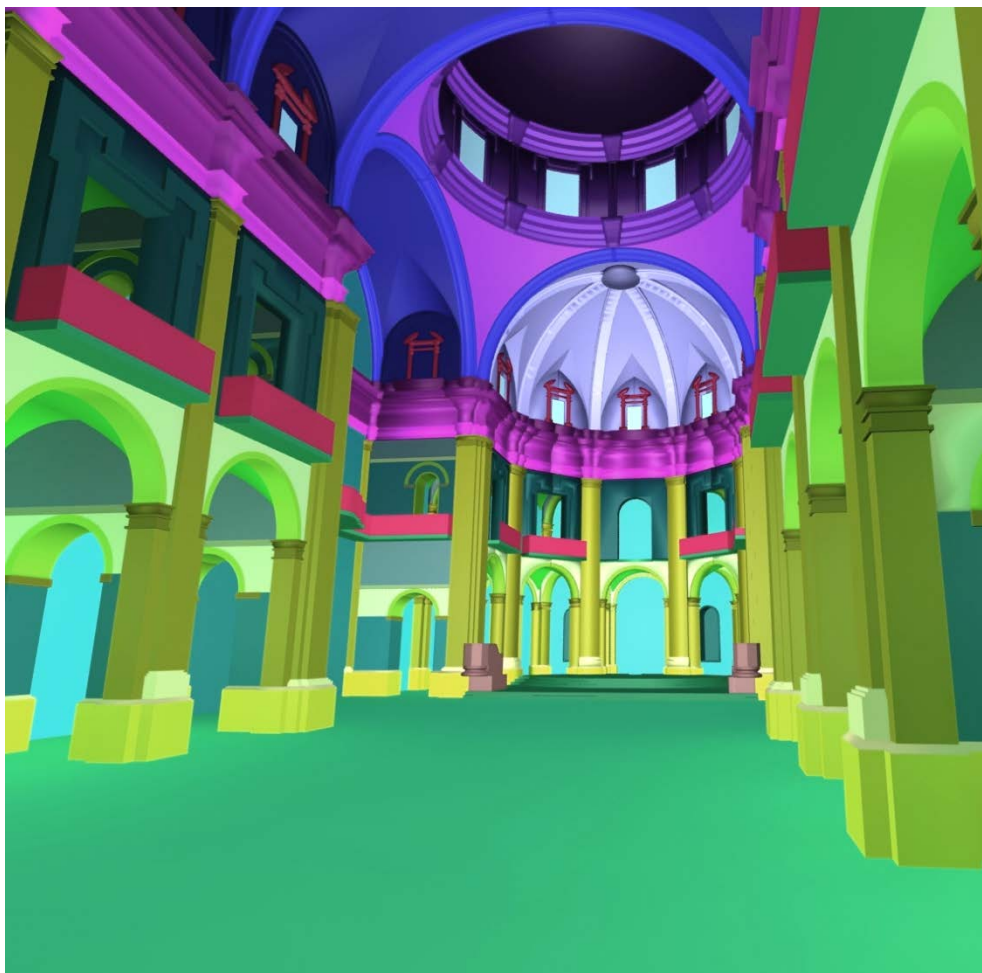


Figura IV.3.2. Modelo detallado de la Basílica de Santa María previo a la aplicación de materiales, texturas e iluminación y a la inserción de mobiliario y objetos.



Figura IV.3.3. Modelo detallado de la Basílica de Santa María una vez aplicadas las texturas de los muros, pilares y bóvedas de piedra, las vidrieras y las pechinas e insertados los bancos.



Figura IV.3.4. Modelo detallado de la Basílica de Santa María una vez aplicadas las texturas de los muros, pilares y bóvedas de piedra, las vidrieras, pechinas, pavimento y balcones, e insertados los bancos y algunos elementos decorativos de las capillas.

Por otra parte, el interior de los espacios litúrgicos se encuentra lleno de elementos pictóricos y escultóricos de carácter simbólico y decorativo. Como se ha comentado anteriormente, algunos de ellos, como bancos o púlpitos se han modelado, pero a la hora de realizar una maqueta virtual sería extremadamente costoso incorporar todos estos elementos, lo cual, por otra parte, tampoco resulta necesario ya que algunos de ellos pasan desapercibidos y son prescindibles para la sensación inmersiva.

No obstante, otros elementos son identificativos de la sala y fundamentales en la configuración del espacio interior, por lo que resulta indispensable modelarlos. En el caso de la Basílica de Santa María de Eliche, existen tres elementos imprescindibles que cuentan con geometrías complejas por lo que no pueden ser representados mediante un plano y una fotografía. Se trata del órgano, el tabernáculo y el retablo mayor.

Se han planteado dos posibles sistemas para modelar estos elementos que no pueden obviarse en la maqueta virtual. La primera opción es realizar un modelo del objeto mediante fotogrametría digital a partir de fotografías del mismo, el segundo es modelar los diferentes elementos y asignarle a cada uno la textura del material correspondiente.

Los posibles problemas para el empleo de técnicas fotogramétricas son:

- Se trata de elementos con altura considerable y resulta difícil fotografiar ciertas zonas.
- En el caso del órgano resulta prácticamente imposible fotografiar la parte superior del mismo y los materiales reflectantes, como el metal de los tubos, dan errores.
- En el caso del retablo, la presencia del tabernáculo dificulta la toma de fotografías por lo que pueden existir zonas en sombra.

Posibles problemas modelado tradicional:

- Geometría bastante compleja por lo que resulta considerablemente costoso.
- Dificultad a la hora de conseguir las texturas planas de todos los materiales ya que las fotografías se toman a una cierta distancia y diferencia de altura.

En el caso del tabernáculo y el retablo mayor se ha optado finalmente por la segunda opción, encontrándose la texturización en un estado bastante avanzado como se observa en las figuras IV.3.5. y IV.3.6.



Figura IV.3.5. Evolución del proceso de texturización del ábside y los distintos elementos que lo componen, entre los que destaca el tabernáculo.



Figura IV.3.6. Textura a aplicar en la parte superior del retablo mayor.

La iluminación es la encargada de otorgar realismo a la maqueta virtual. Independientemente del grado de detalle del modelo y la calidad de las texturas, la correcta iluminación de la escena es la que marca la diferencia y conlleva un trabajo específico una vez finalizado el modelado y asignación de materiales.

El software 3dStudio Max incluye dos sistemas de iluminación: fotométrico y estándar y varios tipos de luminarias tanto direccionales como omnidireccionales. Por otra parte, permite regular automáticamente el nivel de exposición lumínica seleccionando el tipo de escena (interior o exterior) y el momento del día (diurno o nocturno).

En este caso, se está buscando una iluminación natural diurna mediante el empleo de una única luz exterior al modelo emulando al sol, y se ha seleccionado un nivel de exposición diurno en interior, aunque no se descarta la colocación de luces auxiliares en puntos concretos del espacio interior para emular las luminarias existentes en la Basílica de Santa María.

Las figuras IV.3.7 y IV.3.8 muestran el estado en el que se encuentra la simulación gráfica de la Basílica, en la que como se aprecia, se están incorporando también las estructuras de madera que se utilizan para la representación del Misteri, estando prevista también la colocación del cielo que cubre la cúpula.



Figura IV.3.7. Imagen virtual de la Basílica de Santa María vista desde el crucero hacia los pies de la nave.



Figura IV.3.8. Imagen virtual de la Basílica de Santa María con el andador, tribunas y cadafal. Vista desde la nave hacia el altar mayor.

IV.3.3 Integración con entornos de realidad virtual

Aunque no se ha finalizado todavía la texturización completa de la Basílica de Santa María, el objetivo último será la integración de la misma en entornos de realidad virtual, siguiendo el procedimiento ya realizado con otras salas y que se describe a continuación.

A partir del estudio preliminar realizado (Montell et al., 2009), se ha creado un sistema de navegación de entornos virtuales en primera persona mediante el desarrollo de una interfaz de navegación de entornos simulados, que integra simulación acústica y gráfica con el objetivo de que el usuario pueda desplazarse por el modelo visual de la sala objeto de análisis mientras percibe el sonido auralizado correspondiente a la posición en la que se encuentra (Montell et al., 2010). Este sistema ha sido aplicado a diferentes tecnologías inmersivas: Power Wall y CAVE, que se muestran en la figura IV.3.9.

El CAVE es un espacio compuesto por cuatro superficies en forma de cubo retroproyectadas (tres paredes y suelo). En el CAVE se proyectan imágenes estereoscópicas que, con la ayuda de unas gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores, son percibidas como 3D. Además de las gafas, el usuario lleva unos sensores que captan sus movimientos en la sala y permiten al ordenador actualizar la imagen proyectada de acuerdo al nuevo punto de vista. Esta sala incorpora una instalación de altavoces 5.1 y permite la utilización de auriculares.

La Powerwall es una gran pantalla retroproyectada de alta definición (2x5 metros) que, al igual que el CAVE, emite imágenes estereoscópicas que se visualizan con la ayuda de gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores. La Powerwall se encuentra en una sala con capacidad para 25 personas situadas en una grada de 4 filas. Actualmente, ésta dispone de un sistema de altavoces 5.1 para emitir sonido espacial.

Ambas salas tienen sus ventajas e inconvenientes. En el CAVE se dispone de un sistema de seguimiento del movimiento que aumenta la sensación de inmersión en el entorno y que transmite las posiciones tanto al ordenador encargado de los proyectores como al navegador, que actualiza el sonido auralizado en tiempo real. Debido a estos sensores, sólo puede hacer uso del CAVE una persona a la vez. Por otro lado, los proyectores que se utilizan en el CAVE tienen una resolución baja (1024 x 1024). La Powerwall, en cambio, dispone de unos proyectores de alta resolución que permiten apreciar con claridad todos los detalles de la sala modelada. Ésta tecnología, al no disponer del sistema de seguimiento, puede ser utilizada simultáneamente por varias personas. No obstante, no todos los asientos pueden ser ocupados, ya que la reproducción en el sistema de audio 5.1 sólo se percibe correctamente en el centro de la sala, y por tanto, el espacio de recepción correcta es de aproximadamente 10 personas. Además, en la reproducción por altavoces hay

que tener en cuenta que el sonido de la sala de reproducción (aire acondicionado, otras personas hablando, sonidos externos a la sala, etc.) interferirá con el sonido emitido auralizado. La solución propuesta para los dos últimos problemas es utilizar auriculares. Estos aislarán el sonido de la sala y permitirán una correcta percepción acústica en toda la audiencia.

Sobre los modelos simulados, texturizados y auralizados, se han realizado test de análisis del método de evaluación de factores de calidad de audición de salas sobre los dos sistemas de proyección (CAVE y PowerWall), para posteriormente realizar estudios de las salas modeladas, por parte de expertos, que puedan valorar diferentes parámetros en diferentes puntos de la sala, y nos permita extraer conclusiones tanto sobre la influencia que supone el sistema de proyección usado, como la valoración de la acústica de la sala de manera virtual, sin necesidad de estar presente en la sala en los momentos en los que se realizan conciertos. La diferencia entre los dos sistemas de proyección radica principalmente, en el grado de inmersión que consiguen sobre el espectador.

En las pruebas realizadas, se proyectó la aplicación y se mostró a un grupo de personas, clasificados en expertos y no expertos musicalmente. A éstos se les mostró la encuesta y se les explicaron todos los puntos. A continuación, escucharon y vieron la simulación del Paraninfo a través del navegador desde las tres posiciones fijadas. Posteriormente, rellenaron la encuesta indicando además, la preferencia por alguna de las posiciones, en cuyo caso, debían indicar la razón de la preferencia en términos acústicos.

El objetivo de este trabajo es obtener respuestas subjetivas mediante el uso del navegador propuesto en este artículo. En proyectos anteriores, se realizó un pase de encuestas en diferentes salas durante representaciones musicales con el objetivo de obtener un conjunto de parámetros que caractericen subjetivamente las salas y sirvan de evaluadores de la calidad. El objetivo en este caso es, además, comprobar si la simulación es subjetivamente válida. Es decir, que el sonido percibido por la audiencia es equivalente al que se percibiría en la sala real. De esta forma, el pase de encuestas en futuros estudios se podría realizar a partir de las simulaciones, lo que supondría un ahorro en tiempo y esfuerzo invertidos en ello.

Se han comparado estos dos dispositivos de visualización y reproducción de la señal auralizada, el "Cave" y la "PowerWall" y simultáneamente el error intra e interobservador del método de simulación. El ensayo se ha realizado en tres salas y en distintas posiciones en cada una de ellas por expertos acústicos, experto musical y aficionado (Cibrián et al., 2011).



Figura IV.3.9. Ejemplos de integración de otros modelos en los dos entornos trabajados: cave (arriba) y powerwall (abajo).

IV.3.4 Conclusiones

El objetivo último de la virtualización de la Basílica de Santa María es la creación de un entorno lo más realista posible tanto a nivel visual como acústico. La complejidad de los espacios de culto y la gran cantidad de elementos existentes en ellos dificulta y ralentiza el trabajo de modelado y texturizado tradicional considerablemente, siendo necesaria la combinación de diferentes programas y técnicas para conseguir buenos resultados.

La texturización de la Basílica de Santa María se encuentra en un estado avanzado, contando con los elementos constructivos y la mayoría de los decorativos fundamentales identificativos de este espacio y permitiendo su reconocimiento.

El empleo de sistemas novedosos como los escáneres Láser 3D, que actualmente incorporan cámaras fotográficas y permiten obtener nubes de puntos con colores y texturas reales que pueden facilitar enormemente el trabajo.

Capítulo IV.4

Auralización

Auralizar consiste en simular la experiencia sonora en una determinada posición del espacio modelado, haciendo audible el comportamiento sonoro de un recinto mediante un proceso de modelización física o matemática del campo sonoro de una fuente concreta en dicho espacio (Barba, 2016).

La utilidad de la auralización incluye los campos del diseño acústico, la rehabilitación acústica y el conocimiento sonoro de espacios desaparecidos. En el primer caso, permite comprobar auditivamente la calidad acústica del espacio diseñado antes de materializar su construcción o rehabilitación, sin necesidad de estar habituado al lenguaje de la disciplina acústica y facilitando la elección de las soluciones más apropiadas desde la fase de proyecto con el consiguiente ahorro económico. En el caso de edificios total o parcialmente desaparecidos (acústica arqueológica), permite conocer y evocar el ambiente acústico de esos espacios que no podría percibirse de manera real, dado el estado de los mismos.

Existen varios métodos para llevar a cabo las auralizaciones, el más utilizado y el que se ha empleado en este trabajo es la auralización calculada por ordenador, en la cual se utiliza un modelo geométrico virtual a escala de la sala, al que se aplican algoritmos de predicción de las respuestas impulsivas (IR) de la misma que después se procesan obteniendo la señal audible correspondiente.

Se han auralizado tres tipos de señales, coincidiendo con las fuentes reales existentes en la Basílica de Santa María: el habla, presente en la celebración del culto, el órgano, elemento con gran presencia en la iglesia, y el Misteri d'Elx. Los resultados se incluyen en el cd adjunto.

IV.4.1. Auralización del habla

La celebración del culto es una de las dos actividades principales que se realizan en la Basílica de Santa María. Para su auralización se ha situado la fuente en el altar, desde el que se offician las ceremonias y se han colocado varios receptores distribuidos en las diferentes zonas estudiadas para percibir las diferencias existentes entre unas y otras.

IV.4.2. Auralización del órgano

El órgano constituye un elemento con gran presencia en el interior de la Basílica, en la que se realizan conciertos de este instrumento. Por ello, se ha llevado a cabo la auralización con la fuente en el órgano para varios receptores. Permitiendo percibir el sonido del mismo en las diferentes posiciones de receptor.

La pieza de órgano que se ha auralizado se titula Pange Lingua y fue compuesta por el maestro de capillas Josep Perandreu mediados del siglo XVII. Esta pieza ha sido grabada empleando una grabadora ZOOM H2 colocada en el interior del órgano menor para aproximarse a una grabación seca, e interpretada por el organista Dr. Arturo Barba Sevillano.

IV.4.3. Auralización del Misteri d'Elx.

IV.4.3.1. Registro de la fuente cantada

Uno de los principales problemas para la obtención de auralizaciones en diferentes entornos es la obtención de grabaciones anecoicas, o equivalentes a las condiciones de campo libre, con las cuales se realiza la convolución, con las características acústico-energéticas en cada ubicación, a partir de la medida de la respuesta impulsiva en cada punto del entorno. Al contrario de lo que ocurre con el habla o la música de órgano, de los que existen grabaciones anecoicas, la obtención de la señal anecoica del Misteri no es una tarea sencilla.

La dificultad radica en que el registro de la señal en condiciones anecoicas dentro de una cámara resulta prácticamente imposible de realizar en este caso. La obra contiene piezas a una voz, ya que casi todas ellas se basan en la monodia gregoriana, a dos voces, tríos y piezas corales. Los cantores necesitan escucharse tanto a sí mismos si son solistas, como al resto del grupo si actúan como coro o agrupaciones musicales, por lo que no es posible hacerles actuar de forma independiente en la cámara, ni introducir a la agrupación completa en la misma, dado el gran número de intérpretes de algunas piezas.

Por este motivo, para obtener las grabaciones "anecoicas" necesarias para realizar la convolución con las IR, se ha optado por una grabación de la señal reduciendo al máximo el ruido de fondo y la reverberación, para una vez grabada la señal no anecoica eliminar la contribución de la sala y poder obtener una señal equivalente a campo libre.

Se ha realizado una grabación de la obra completa en la sala de ensayo de los cantores y escolanía del Misteri, ubicada en la Casa de la Festa, tal y como muestra la figura IV.4.1. Se trata de una sala de planta rectangular de 8 x 16,70 metros con techo plano y una altura libre de 2,60 metros. Las paredes son ciegas a excepción de las puertas de acceso a la misma y de dos grandes huecos resueltos con ladrillos de vidrio que le aportan iluminación en uno de sus lados cortos. Para evitar la influencia de los ventanales en el comportamiento acústico de la sala se cubrieron los mismos con una cortina acústica. Con todo ellos se perseguía, como se ha comentado, reducir el ruido de fondo y la reverberación al máximo.

Para localizar las posiciones de los cantores lo que permitió conocer se construyó una retícula siguiendo el pavimento de la sala de aproximadamente 55x55 cm y se colocaron ocho micrófonos normalizados, cuatro omnidireccionales y cuatro direccionales, en el centro de los lados y en las esquinas del cuadrado que circunscribía la retícula.

Los cantores se situaron en puntos de la retícula de forma que los micrófonos rodeaban la fuente sonora, y permitiendo conocer la distancia que separaba a cada intérprete de cada uno de los micrófonos.

Por otra parte, con la sala vacía y fuente omnidireccional que se iba ubicando en los diferentes puntos de la cuadrícula, mediante una señal sweep se realizaron grabaciones con todos los micrófonos que nos permitirá obtener la IR de la sala (Cerdá et al., 2014). La grabación de un cantor se realizó registrando su localización y con los micrófonos en la misma situación.



Figura IV.4.1. Proceso de grabación del Misteri d'Elx en la sala de ensayo con los cantores y la escolanía.

Se utilizó un sistema multicanal de grabación formado por 8 micrófonos (cuatro omnidireccionales y cuatro direccionales) que rodean la fuente sonora y registran las señales simultáneamente. Este tipo de disposición de micrófonos permite obtener grabaciones para diversos formatos estándares de reproducción de audio: estéreo, cuadrafónico, 5.1 y 7.1. Al mismo tiempo se

realizó la grabación binaural mediante un torso de Head Acoustics y unos auriculares-micrófono. Este dispositivo nos permite comparar los distintos formatos y las grabaciones binaurales mediante la determinación de diferentes parámetros objetivos. La figura IV.4.2 muestra la planta y sección de la sala y la colocación de la retícula en su interior. La distribución de cantores y micrófonos se muestra en la figura IV.4.3.

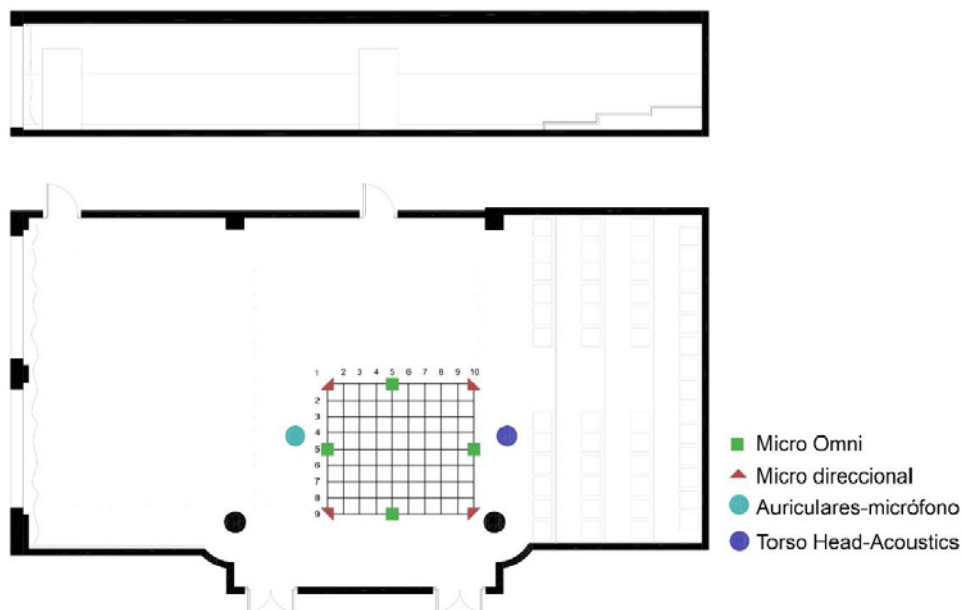


Figura IV.4.2. Planta y sección de la sala en la que se realizaron las grabaciones y ubicación de la retícula y micrófonos dentro de la misma.

La grabación de los cantores se realizó registrando sus localizaciones y manteniendo los micrófonos en la misma posición. Con la sala vacía y fuente omnidireccional mediante una señal sweep se obtuvo la IR de la sala para cada punto de la retícula creada. Para el caso del coro, que es tuvo formado en diversos momentos por un número variable de personas, se determinaron las respuestas impulsivas colocando la fuente en una cuadrícula densa rectangular de posiciones. De esta manera se conoce el efecto de la sala sobre las grabaciones realizadas.

Para el registro y análisis de la obra en cuestión por parte de los cantores de la Capella del Misteri se ha seguido una metodología experimental basada en los requerimientos de la ISO-3382 e IEC60268, pero además se han medido un significativo número de puntos adicionales y se ha situado la fuente en diversos

emplazamientos para la obtención de un mayor número de puntos con los que obtener las IRs correspondientes para un posterior trabajo de tratamiento de la señal más preciso.

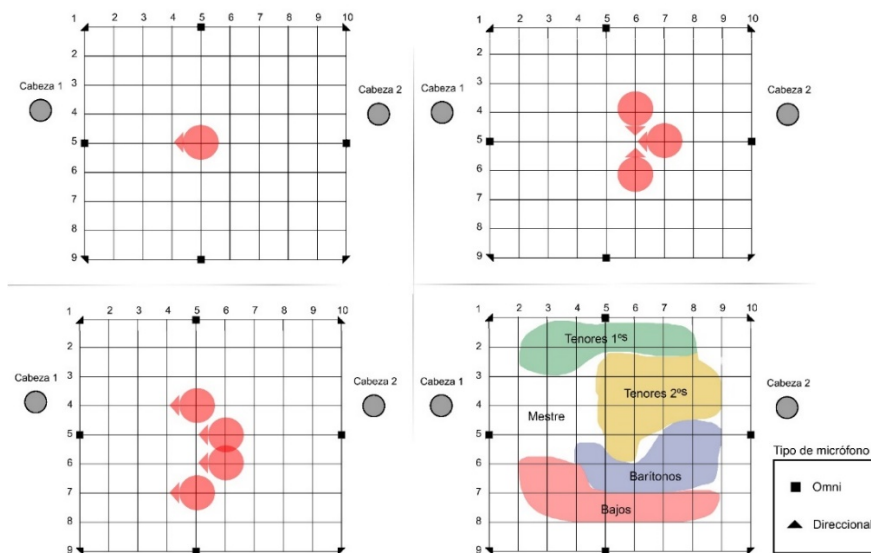


Figura IV.4.3. Esquema de la distribución de la retícula, cantores y micrófonos para la grabación.

A partir de la respuesta impulsiva registrada en la localización del cantor por los ocho micrófonos, podemos diseñar un filtro inverso en dominio de la frecuencia (que corresponde a la función de transferencia) del tipo que se muestra en la ecuación:

$$TF(f) = \frac{fft(IR_{ini})}{(|fft(IR_{ini})|^2 + \delta)}$$

En esta ecuación, se ha introducido un factor de regularización, que toma un valor de $\delta=10^{-2} \text{ Hz}^2$ y que es independiente de la frecuencia, el cual permite hacer que el filtro inverso sea estable. Además, sólo se ha considerado la señal a invertir hasta primera reflexión de la IR, por lo que el filtro únicamente refleja el sonido directo. En este caso se ha considerado que era suficiente con usar el intervalo temporal $[0, 0.02] \text{ s}$ para considerar la primera reflexión en la respuesta impulsiva inicial (IR_{ini}).

Este proceso se ha realizado para cada uno de los micrófonos de manera que se ha obtenido la función de transferencia de la fuente a cada micrófono. Finalmente, el producto de estas funciones con la transformada de Fourier de la señal cantada registrada ha permitido obtener la señal anecoica de la canción, que se ha utilizado para auralizar la señal en el entorno (Planells et al, 2015).

IV.4.3.2. Auralización de la fuente cantor en el entorno simulado

En lo referente al Misteri se han llevado a cabo dos auralizaciones. En primer lugar se ha seleccionado la pieza titulada “Germanes mies” cantada por un niño que representa a la virgen María en el inicio del andador y cuya grabación se ha dereverberado siguiendo el proceso anteriormente descrito, empleando el micrófono omnidireccional frontal. En la simulación se ha obtenido la IR correspondiente ubicando la fuente cercana a la puerta principal del edificio tanto para la configuración espacial propia de la representación del Misteri como para la del culto, permitiendo apreciar las diferencias sonoras.

Por otra parte se ha realizado la auralización de la subida al cielo del Araceli. Para ello se han obtenido las IR correspondientes a partir de la simulación con la fuente situada sobre el cadafal y desplazándola hacia arriba en intervalos de 1 metro de longitud hasta llegar a los 23 metros de altura de la lona que simula el cielo. De nuevo se han colocado varias posiciones de receptor permitiendo apreciar las diferencias de percepción entre unas zonas y otras de la Basílica.

IV.4.4. Conclusiones

Se han realizado auralizaciones para los diferentes tipos de señales habituales en la Basílica: habla, órgano y música del Misteri, lo que permite comprobar las variaciones de percepción del sonido entre unas zonas y otras en cada uso.

En el caso del Misteri, la investigación ha permitido la obtención de la señal dereverberada para un a voz. Además se han llevado a cabo tanto auralizaciones estáticas como dinámicas, reproduciendo el movimiento del Araceli que sube al cielo.

La base de las auralizaciones, sin considerar cuestiones de la propia señal anecoica o de directividad de fuente y/o receptor, son siempre las respuestas impulsivas. Por ello un estudio comparativo entre la medida y la simulación es imprescindible para entender las posibles diferencias perceptivas. Las obtenidas a partir de las IRs simuladas se perciben más agudas.

El desconocimiento del comportamiento de la sala y las características de los materiales para frecuencias muy altas, presentes en la música, abre una futura línea de investigación importante y compleja, de cara a mejorar el conocimiento y la calidad de las auralizaciones.

Capítulo V.

Conclusiones

Al final de cada uno de los capítulos se han recopilado las conclusiones específicas de las diferentes partes del trabajo. A continuación se recogen las conclusiones generales extraídas de la investigación.

V.1. Conclusiones relativas a la caracterización acústica de la Basílica de Santa María

El trabajo realizado ha permitido en primer lugar, optimizar el proceso de modelado para la simulación gráfica y acústica de edificios históricos con valor patrimonial, determinando la necesidad de trabajar con dos modelos diferenciados que cumplan con los requerimientos propios de cada tipo de simulación.

Se ha caracterizado acústicamente la Basílica de Santa María de Elche tanto para la configuración propia del culto como para los cambios espaciales que tienen lugar en la representación del Misteri, determinando las diferencias existentes en ambos casos y así como la influencia de la presencia del público. Este trabajo ha permitido conocer de manera exhaustiva el comportamiento acústico de un espacio en el que el sonido adquiere una importancia fundamental al ser el escenario de una de las Obras Maestras del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la Unesco en 2001 y que no había sido estudiado hasta el momento.

Se han realizado medidas de parámetros acústicos en la Basílica para los dos usos principales, culto y Misteri, a partir de las cuales se han realizado y validado las simulaciones. Mediante las medidas, se han analizado como afectan los cambios espaciales, y empleando las simulaciones previamente validadas para establecer la influencia del público. El análisis llevado a cabo demuestra que la basílica tiene un comportamiento acústico diferente cuando se prepara para el culto del que tiene durante la representación teatral.

En el proceso se han identificado los principales problemas a la hora de aplicar la acústica virtual en edificios históricos con geometrías mucho más complejas que las salas de actos y conciertos, y materiales poco absorbentes de los que se desconocen las características acústicas.

Los parámetros de reverberación presentan una homogeneidad suficiente para ser estudiados de manera global, no obstante, la complejidad espacial genera la necesidad de realizar un análisis por zonas en el resto de parámetros ya que su comportamiento varía notablemente de unas a otras.

Por otra parte, las sucesivas intervenciones llevadas a cabo en la Basílica muestran una de las características fundamentales de los edificios históricos: la heterogeneidad de los materiales y elementos. La larga vida de estas construcciones hace que hayan sufrido, desgastes, cambios e intervenciones y

que lo que aparentemente puede parecer un material único constituya una variedad considerable de soluciones cuyas propiedades de absorción acústica varíen entre sí. Por ello es necesario un análisis exhaustivo de los componentes y elementos que conforman el edificio. En este sentido se ha elaborado un protocolo de medida in situ y se ha realizado una primera aproximación a la determinación de los coeficientes de absorción acústica de los materiales predominantes en la Basílica. Se ha realizado una campaña de medición de los coeficientes de absorción de los materiales presentes en la Basílica. Se han estudiado los resultados obtenidos para los dos materiales predominantes que son la fábrica de piedra y el pavimento de la nave. En ambos casos los coeficientes de absorción medidos son considerablemente superiores a los normalizados y empleados en la calibración y simulación inicial. Más allá de las diferencias cuantitativas destaca el hecho de que los resultados de las medidas in situ muestran que el pavimento de mármol es más absorbente que la fábrica de piedra, mientras que en la hipótesis empleada en la simulación es al contrario. El uso de los coeficientes de absorción medios de las medidas in situ en la simulación aportaría unos tiempos de reverberación muy inferiores a los reales por lo que será necesario un estudio más profundo de los materiales ya que las absorciones medidas varían ampliamente de unos puntos a otros, por lo que no se puede establecer un valor medio para el conjunto del material.

V.2.Conclusiones relativas a la virtualización completa del Misteri d'Elx.

Se han realizado avances de cara a una virtualización completa de la representación del Misteri d'Elx tanto desde el punto de vista visual como del acústico.

Se ha construido un modelo detallado del interior de la Basílica y se le han aplicado texturas y luces para obtener un entorno lo más realista posible. Aunque no se ha finalizado, los resultados que se están obteniendo son buenos y se identifica perfectamente tanto el espacio como los elementos más significativos que alberga en su interior.

A partir de las grabaciones realizadas con los cantores del Misteri en el lugar de ensayo, se ha procedido a la dereverberación de la señal para aproximarla a las condiciones de campo libre necesaria para la auralización. Se ha realizado la dereverberación de la señal para una voz y tres voces y se sigue mejorando este estudio comparando y evaluando algoritmos de estimación de filtros de reverberación.

V.3. Futuras líneas de investigación

Los valores medios de parámetros establecidos como referencia para la calidad acústica de los espacios están basados en salas de conciertos y no son válidos para recintos de culto, en los que las exigencias son distintas. Por ello, aunque se ha evaluado la calidad mediante índices sintéticos, y como se adelantaba en el capítulo de metodología, el trabajo deberá completarse con la valoración subjetiva mediante encuestas, que no se ha realizado todavía por los problemas logísticos que conlleva.

Por otra parte, en la campaña de medidas de absorción no se tuvo acceso a las bóvedas. La superficie de bóvedas en el modelo es considerable y no se produce el desgaste que sufren las fábricas accesibles a los visitantes por lo que la absorción en estas zonas podría variar notablemente. En este sentido, y de cara a futuros análisis de otros edificios, sería de gran interés la creación de una base de datos referente a la absorción acústica de las fábricas de piedra vista, por tratarse de sistemas muy habituales en este tipo de edificios y de los que prácticamente no existen referencias en cuanto a comportamiento acústico.

El estudio histórico ha permitido la identificación de etapas anteriores en la representación del Misteri en la Basílica de cara a futuras investigaciones desde la acústica arqueológica. La actual Basílica de Santa María es el cuarto templo construido en el mismo lugar. Se proyectó basándose en los requerimientos propios de la representación del Misteri en la nave, con la tramoya en la arcada y el terrado, como se realizaba hasta 1761. Por ello, resultaría de interés la virtualización de la representación en dichas condiciones, permitiéndonos conocer el Misteri para el que fue diseñado y construido el templo. Del mismo modo, desde 1686 hasta 1727 que se finaliza la cúpula, la nave se cierra con un muro mientras se realizan las obras del crucero. Lo que constituye una segunda etapa de estudio en la historia de la Basílica. Además, se ha demostrado que ya se realizaban representaciones en las iglesias precedentes. El modelado, simulación y auralización de estas iglesias y etapas permitirá ver y oír la representación del Misteri como se hacía en épocas anteriores.

Por último, cabe señalar la continuación del proceso de dereverberación de la señal de Misteri llevado a cabo en piezas de una y tres voces aplicándolo a los casos de piezas corales.

Capítulo VI.

Bibliografía

- ABDEL, A. O. (1973). *Dependence of time and register definition of room acoustical parameters with music performances*. Dissertation TU.
- AJUNTAMENT D'ELX (2010). *Les empremtes del temps: construcció i restauració de la Basílica de Santa María / Las huellas del tiempo: construcción y restauración de la Basílica de Santa María*. Ajuntament d'Elx. Elche.
- ALONSO, A. (2016). *El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada: acústica y recuperación patrimonial*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
- ALONSO A.; MARTELLOTTA F. (2016). *Room acoustic modelling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches*. Journal of Building Performance Simulation. Vol. 9, No. 5, pp. 469-486.
- ALONSO A., MARTELLOTTA F. (2015). *The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective*. Proceedings of ICSV 2015, Florence, Italy.
- ALONSO, A.; SENDRA J. J.; SUÁREZ R.; ZAMARREÑO T. (2014). *Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners*. Journal of Building Performance Simulation. Vol. 7, núm. 5, pp. 360-378.
- ALONSO A., SUÁREZ R., SENDRA J. J., ÁLVAREZ-MORALES L. (2012). *La acústica del crucero de la Catedral de Sevilla en las grandes celebraciones*. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- ALVAREZ-MORALES, L. (2016) *Acústica de grandes espacios de culto*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
- ÁLVAREZ-MORALES, L., GIRÓN, S., GALINDO, M., ZAMARREÑO, T. (2016) *Acoustic Environment of Andalusian Cathedrals*. Building and Environment 103, pp. 182-92.
- ALVAREZ-MORALES, L.; MARTELLOTTA, F. (2015) *A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches*. Applied Acoustics, Volume 91, pp. 47-58.
- ÁLVAREZ-MORALES L., ALONSO A., GIRÓN S., GALINDO, M., SUÁREZ R. (2015). *Absorción acústica de materiales textiles en recintos de culto*. Proceedings of TecniAcústica 2015, pp. 705-712.
- ÁLVAREZ-MORALES, L.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. (2014). *A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga*. Building and Environment. Vol. 72 pp. 102-115.

- ÁLVAREZ-MORALES L., ALONSO A., GALINDO M., ZAMARREÑO T., GIRÓN S. (2011). *Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville*. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, pp. 106-113.
- ANDERSON J. S., BRATOS-ANDERSON M. (2000). *Acoustic coupling effects in St. Paul's Cathedral, London*. J. Sound Vib, 236, 209-225.
- ANDERSON J. S.; BRATOS-ANDERSON M. (1999). *St. Paul's Cathedral, London, as a concert hall*. Proceedings of 6th ICSV, Copenhagen, Denmark.
- ANDO Y. (1985). *Concert hall acoustics*. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany
- ARAU, H. (1988). *An Improved Reverberation Formula*. Acústica, 65 (4), pp. 163-180.
- BARBA, A. (2016). La acústica virtual como herramienta arqueológica. Historia y sonido en el Teatro Principal de Valencia. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- BARBA, A.; SEGURA, J.; CERDÁ, S.; PLANELL, A.; CATALÁ, P.; ROMERO, J.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2014). *Evaluación de la respuesta subjetiva de diferentes instrumentos de percusión en varias salas*. Proceedings del 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica y Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental. pp. 1246 – 1251. Murcia.
- BARRON, M.; LEE, L.J. (1998). *Energy relations in concert auditorium*. Journal of the Acoustical Society of America, 84 (2), pp. 618-628.
- BARRON, M. (1995). *Interpretation of early decay times in concert auditoria*. Acustica, 81, 320-331.
- BARRON, M.; MARSHALL, A. H. (1981). *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure*. Journal of Sound and Vibration, 77 (2), pp. 211-232.
- BERANEK L. L. (2004). *Concert halls and opera houses –Music acoustics and architecture*. Segunda ed. Springer Verlag, New York, USA.
- BERANEK L. L. (1993). *Acoustics*. Acoustical Society of America. New York, USA.
- BERANEK L. L. (1979). *Music, acoustics and architecture*. RE K rieger Publishing Company, New York, USA.
- BERARDI, U.; MARTELLOTTA F. (2014). *The position of the sound source in churches*. Proceedings of Meeting on Acoustics, vol. 21.
- BERARDI, U. (2013). *Simulation of acoustical parameters in rectangular churches*. Journal of Building Performance Simulation, vol. 7, pp. 1-16.

- BERARDI, U. (2012). *A Double Synthetic Index to Evaluate the Acoustics of Churches*. Archives of Acoustics. Vol. 37, 4, pp. 521–528.
- BRADLEY D. T., RYHERD E. E., RONSSE L. (2016). *Worship spaces acoustics: 3 Decades of design*. Springer, New York, USA.
- CARVALHO, A. (2009) *Caracterização acústica da Mega-igreja da Santíssima Trindade- Fátima*. Tecniacústica 2009, Cádiz.
- CARVALHO, A. (1994) *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. Ph.D., Univ. Florida.
- CASTAÑO, J. (2013). *Los archivos parroquiales: fuente para la investigación histórica*. Facies Domini 5, pp. 273-291.
- CERDÁ, S.; QUEROL, L.; PLANELLS, A.; SEGURA, J.; MONTELL, R.; GIMÉNEZ, A. (2014). *Auralization of a heritage (UNESCO) civil gothic building: the "Lonja de la Seda"*. Forum Acusticum 2014. Cracovia, Polonia.
- CERDÁ, S., LACATIS, R., & GIMÉNEZ, A. (2013). *On absorption and scattering coefficient effects in modelisation software*. Acoustics Australia, 41, pp. 151-155.
- CERDÁ, S., LACATIS, R., SEGURA, J., MONTELL, R., BARBA, A., CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2011). *On absorption and diffusion coefficients in acoustic simulation softwares: effects on parameters*. En International Seminar on Virtual Acoustics. pp 130-137. Valencia.
- CERDÁ S., GIMÉNEZ A., ROMERO J., CIBRIÁN R., MIRALLES J. L. (2009). *Room acoustical parameters: A factor analysis approach*. Applied Acoustics, 70, pp. 97-109.
- CERVERA, O., MOYA, A., QUEROL, L., PLANELLS, A., PÉREZ, C.; MONTELL, R. (2012). *Técnicas de modelado tridimensional y su aplicación en la auralización de espacios*. En 43º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2012", Evora.
- CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A.; SEGURA, J.; BARBA, A.; VERA, L.; PONZ, S.; LACATIS, R.; CERDÁ, S.; MONTELLS, R.; PLANELLS, A. (2011). *Error inter e intraobservador en la valoración acústica de salas en entornos virtuales, mediante encuesta de valoración subjetiva*. 42º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable, pp. 41-50.
- CIRILLO, E., MARTELLOTA, F. (2006). *Worship, Acoustics and Architecture*. Multi Science Publishing Company.
- CIRILLO, E., MARTELLOTA, F. (2002). *Acoustics of Apulian-romanesque churches: an experimental survey*. Building Acoustics 9(4), pp. 271-288..

- COQUILLAT, M. (1903). *Proyecto de reparación de la Insigne Iglesia parroquial de Santa María de la ciudad de Elche*. Barcelona.
- COX T. J.; D'ANTONIO P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application*. Second edition, Taylor & Francis, Abingdon, Oxfordshire, UK.
- COX T. J.; DALENBACK B. I.; D'ANTONIO P.; EMBRECHTS J. J.; JEON J. Y.; MOMMERTZ E.; VORLÄNDER M. (2006). A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acustica United with Acustica*, 92(1), pp. 1-15.
- DALENBÄCK B. I. (2011). *CATT-Acoustic v9 powered by TUCT user manuals*. Computer Aided Theatre Technique. Gothenburg (Sweden).
- DE BARRIO, J. I. (2008). *Sistemas de predicción de parámetros que caracterizan el campo sonoro en iglesias*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- DIAS, P.; CAMPOS, G.; SANTOS, V.; CASALEIRO, R.; SECO, R.; SANTOS, B.S. (2008). *3D reconstruction and spatial auralization of the Painted Dolmen of Antelas*. Proc. SPIE 6805, 68050Y.
- ELICIO, L.; MARTELLOTTA, F. (2015). *Acoustics as a cultural heritage: The case of Orthodox churches and of the "Russian church" in Bari*, Journal of Cultural Heritage, Volume 16, Issue 6, pp. 912-917.
- EYRING, C. F. (1930). *Reverberation Time in "Dead" Rooms*. Journal of the Acoustical Society of America, 1, pp. 217-241.
- FITZROY, D. (1959). *Reverberation formulae which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption*. Journal of the Acoustical Society of America, 31, pp. 893-897.
- FUENTES, J. (1887). *Memoria histórico-descriptiva del santuario de Nuestra Señora de la Asunción en la ciudad de Elche*. Tipografía Mariana. Lérida.
- GALINDO, M. (2003). *La acústica en espacios religiosos católicos: las iglesias Gótico-Mudéjares*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- GARCÍA, F.; PLANELLS, A.; CERDÁ, S.; SEGURA, J.; MONTELL, R.; BARBA, A.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2014). *Archeological acoustics of the venue of the "Misteri d'Elx", oral and intangible cultural heritage (UNESCO): "Basilica de Santa María De Elche"*. Forum Acusticum 2014. Cracovia, Polonia.
- GARCÍA, F. (2013). *Acústica arqueológica y auralización de un edificio patrimonial, Misteri D'Elx - Basílica Santa María De Elche*. Tesina de Máster. Universitat Politècnica de València.

- GIMÉNEZ A.; CIBRIÁN R.; CERDÁ S.; GIRÓN S.; ZAMARREÑO T. (2014). Mismatches between objective parameters and measured perception assessment in room acoustics: A holistic approach. *Building and Environment*, 74, pp. 119-131.
- GIMÉNEZ A., CIBRIÁN R. M., GIRÓN S., ZAMARREÑO T., SENDRA J. J. (2011). *Questionnaire survey to qualify the acoustics of Spanish concert halls*. *Acta Acustica United with Acustica.*, 97(6), pp. 949-965.
- GIMÉNEZ, A.; SEGURA, J.; CIBRIÁN, R.; CERDÁ, S.; BARBA, A.; MONTELL, R.; PLANELL, A.; NAVASQUILLO, J.; ROMERO, J.; PONZ, S.; LACATIS, R.; FERNÁNDEZ, M.; MIRALLES, J.L. (2011) *Estudio acústico de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico en entornos de realidad virtual. Dificultades y ventajas*. *Tecniacústica 2011*. Cáceres.
- GIMÉNEZ, A. (1987) *Contribución al estudio de la acústica en recintos cerrados. Aplicación a sala de conciertos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- GIRÓN, S., ZAMARREÑO, T., ÁLVAREZ-MORALES, L., GALINDO, M. (2015) *Índices acústicos globales en grandes espacios de culto*. *Proceedings of Tecniacústica 2015*, Valencia.
- HUOPANIEMI, J.; SAVIOJA, L.; TAKALA, T. (1996). *DIVA virtual audio reality system*. *Proceedings of the International Conference Auditory Display*.
- IBARRA, P. (1982). *Historia de Elche. Papers d'Elx*. Elche.
- INSTITUTO DEL PATRIMONIO CULTURAL DE ESPAÑA (2011). *Plan Nacional de Investigación en Conservación del Patrimonio Cultural*. Descargado de http://ipce.mcu.es/pdfs/PN_INVESTIGACION.pdf
- ISO 3382-1. (2009). *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de conciertos*. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland.
- JAEN, G.; SERRANO A. (2009). *Les empremtes del temps. Construcció i restauració de la basílica de Santa Maria*. Ajuntament d'Elx. Elche.
- JAEN, G.; SERRANO A. (1995). *Algunes notes sobre el cel i la tramoia alta de la Festa d'Elx*. El cel en la Festa, Patronat del Misteri d'Elx-Diputació d'Alacant, Alicante. pp. 16-24.
- KLEINER, M., KLEPPER, D., TORRES, R. (2010). *Worship space acoustics*. Ross Publishing.
- KNUDSEN V. O.; HARRIS C. M. (1988). *Acoustical designing in architecture*. Fifth edition. Acoustical Society of America, New York, USA.

- KOSAŁA, K., ENGEL, Z. (2013). *Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach*. Applied Acoustics, Volume 74, Issue 10, pp. 1144-1152.
- KUTTRUFF, H. (1979). *Room acoustics*. London: Elsevier Applied Science, 3^a ed.
- KUTTRUFF, H. (1976). *Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion*. Acustica, 35(3). pp. 141-153.
- KROKSTAD, A., STROM, S., & SØRSDAL, S. (1968). Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. Journal of Sound and Vibration, 8(1), pp. 118-125.
- LI, M.; VAN KEULEN, W.; TIJS, E.; VAN DE VEN, M.; MOLENAAR, A. (2015). *Sound absorption measurement of road surface with in situ technology*. Applied Acoustics 88. pp. 12–21.
- MAGRINI A.; RICCIARDI P. (2003). Churches as auditoria: A analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. Building Acoustics 10(2), 135-157.
- MAGRINI A.; RICCIARDI P. (2002). An experimental study of acoustical parameters in churches. International Journal on Acoustic Vibration, 7(3), pp. 177-183.
- MAGRINI A.; RICCIARDI P. (2002). Coupling effects in Christian churches: Preliminary analysis based on a simple theoretical model and some experimental results. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- MARTELLOTTA, F.; ALVAREZ, L. (2014). Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options. Proceedings de Forum Acusticum 2014.
- MARTELLOTTA F., D'ALBA M., DELLA CROCIATA S. (2011). Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences. Appl. Acoust., 72, 341–349.
- MARTELLOTTA F., DELLA CROCIATA S., D'ALBA M. (2011). On site validation of sound absorption measurements of occupied pews. Appl. Acoust., 72, 923-933.
- MARTELLOTTA F. (2010). *The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces*. Journal of the Acoustical Society of America, 128, pp. 654-663.
- MARTELLOTTA, F.; CIRILLO, E.; CARBONARI, A.; RICCIARDI, P. (2009) *Guidelines for acoustical measurements in churches*. Applied Acoustics. Volume 70, Issue 2, pp. 378-388.

- MARTELOTTA F. (2009). *Identifying acoustical coupling by measurements and prediction models for St. Peter's Basilica in Rome*. Journal of the Acoustical Society of America, 126, 1175-1186.
- MARTELOTTA F., CIRILLO E. (2009). *Experimental studies of sound absorption by church pews*. Applied Acoustics, 70, pp. 441-449.
- MARTELOTTA F. (2008). *Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches*. Journal of Sound and Vibration, 317(1-2), pp. 378-399.
- MARTELOTTA F., CIRILLO E., DELLACROCIATA S., GASPARI E., PREZIOSO D. (2008). *Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during the Baroque period: the effect of festive decorations*. Meeting Abstract in Journal of the Acoustical Society of America, 123, 3607.
- MARTÍNEZ, T. Y MARTÍNEZ, M. (1990) *La arquitectura como escenario del Misterio de Elche*. Caja de Ahorros del Mediterráneo. Elche.
- MENG Z., ZHAO F., HE M. (2006). *The just noticeable difference of noise length and reverberation perception*. Proceedings of ISCIT 2006, Bangkok, Thailand, pp. 418-421.
- MEYER J. (2003). *Kirchenakustik*. Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main, Germany.
- MICROFLOWN TECHNOLOGIES (2013). *Impedance Setup Manual*. Descargado de http://www.microflown.com/files/media/library/Manuals/impedance_setup_manual_102013.pdf
- MILLINGTON, G. (1932). *A Modified Formula for Reverberation*. Journal of the Acoustical Society of America, 4, 69-82.
- MIRASOL, S.; PLANELLAS, A.; BARBA, A.; SEGURA, J.; COBOS, M.; GIMÉNEZ, A. (2016). *Development of a HMD for Virtual Acoustics. Application in a World Heritage (UNESCO) Building from the Valencian Gothic*. Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, pp. 241-250. Springer.
- MONTELL, R.; GIMÉNEZ, A.; CERDÁ, S.; SEGURA, J.; CIBRIÁN, R., BARBA, A. (2012). *Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia*. VIII Congreso Iberoamericano de Acústica. Évora.
- MONTELL R.; GIMÉNEZ A.; SEGURA J.; PLANELLAS A.; BARBA A.; CERDÁ S.; LACATIS R. (2011). *Simulación acústica de auditorios y edificios patrimoniales. Integración con entornos de realidad virtual*. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 185-193.

- MONTELL, R. ; SEGURA, J. ; GIMÉNEZ, A. ; BARBA, A. ; LACATIS, R.; PLANELL, A. (2010a). *A proposal for a tool for automatic correction of geometrical errors in acoustical simulation*. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. 23-27. Sydney, Australia.
- MONTELL, R.; SEGURA, J.; GIMÉNEZ, A.; PLANELL, A.; BARBA, A.; CERDÁ, S.; LACATIS, R.; VERA, L.; MARTÍNEZ, B. (2010b). *Simulación acústica y gráfica. Prototipo de navegación de entornos virtuales*. Actas del 41º Congreso Nacional De Acústica 6º Congreso Ibérico De Acústica. León.
- MONTELL, R. ; SEGURA, J. ; VERA, L. ; BARBA, A. ; GIMÉNEZ, A.; FERNÁNDEZ, M.; ROMERO, J. (2009). *Sistemas de auralización y sonido 3d para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico*. 40º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2009", Cádiz.
- MURDOCK, K. (2009). *3DS Max 2010 bible*. John Wiley & Sons.
- NAVARRO J.; SENDRA J. J., MUÑOZ S. (2009). *The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment*. Applied Acoustics, 70(6), 781-789.
- MUÑOZ S.; SENDRA J. J.; ZAMARREÑO T.; NAVARRO J. (2004). *Resultados de la corrección acústica de un recinto eclesial tras su rehabilitación como espacio escénico*. Proceedings of Acústica 2004, Guimaraes, Portugal.
- NAVARRO J.; SENDRA J. J.; ALGABA J.; ZAMARREÑO T. (1997). *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: Principios y propuestas para la rehabilitación*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Spain.
- NAVARRO, R. (1986). *Els Edificis de la Festa*. Món i Misteri de la Festa d'Elx. Conselleria de Cultura, Educació i Ciència. pp. 45-54.
- NAVARRO, R. (1980). *Los arquitectos del templo de Santa María de Elche*. Caja de Ahorros Provincial de Alicante. Alicante.
- OLIVEIRA DE CARVALHO, A. (1994). *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Tesis doctoral. University of Florida.
- PATRONAT DEL MISTERI D'ELX (s.f.). *La "Festa" o Misteri d'Elx*. Descargado de <http://www.misteridelx.com/es/misteri/#formbsc>.
- PEDRERO, A.; RUIZ, R.; DÍAZ-CHYLA, A.; DÍAZ, C. (2014). *Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses*. Applied Acoustics, Volume 85, pp. 23-33.

- PEDRERO GONZÁLEZ A., DÍAZ-CHYLA A., DÍAZ-SANCHIDRIÁN C., PELZER S., VORLÄNDER, M. (2014). *Virtual restoration of the sound of the Hispanic rite*. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- PEDRERO A.; POLLOW M.; DIETRICH P.; BEHLER G.; VORLÄNDER M.; DÍAZ C.; DÍAZ A. (2012). *Mozarabic chant anechoic recordings for auralization purposes*. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- PÉREZ, C. (2014). *Estudio acústico de recintos orientado a la calibración del modelo virtual y del análisis multifuente. Aplicación al paraninfo de la UPV*. Proyecto final de carrera. Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universitat Politècnica de València.
- PÉREZ, C.; CERDÁ, S.; MONTELL, R.; CIBRIÁN, R.; SEGURA, J.; BARBA, A.; QUEROL, L.; GIMÉNEZ, A. (2013). *Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad*. 44º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, Eaa European Symposium on Environmental Acoustics and Noise Mapping. Valladolid.
- PLANELLS, A.; SEGURA, J.; CERDÁ, S.; BARBA, A.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2016). *¿Son válidos los coeficientes de absorción normalizados en la simulación acústica de edificios patrimoniales?* EAA EuroRegio 2016. Jointly with 9º Iberian Congress and the 47th Spanish Congress on Acoustics, pp. 1-9.
- PLANELLS, A.; SEGURA, J.; CERDÁ, S.; BARBA, A.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2015). *Acústica virtual patrimonial: aplicación a la auralización del Misteri d'Elx*. Proceedings del 46º Congreso Español de Acústica, 9º Congreso Ibérico de Acústica y Simposio Europeo sobre Acústica Virtual y Ambisonics, pp. 1477-1484.
- PLANELLS, A.; GIRÓN, S.; ZAMARREÑO, T.; GIMÉNEZ, A. (2015). *Estudio experimental del soporte de escena en teatros y auditorios*. Proceedings of TecniAcústica 2015, Valencia, pp.1468-1476.
- PLANELLS, A.; SEGURA, J.; BARBA, A.; CERDÁ, S.; GIMÉNEZ, A.; CIBRIÁN, R. M. (2014). *Virtual acoustic reconstruction of the church at the lost monastery of Santa Maria de la Murta*. Augmented and virtual reality, pp. 457-464. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- PLANELLS, A.; MONTELL, R.; SEGURA, J.; BARBA, A.; CERDÁ, S.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2011). *Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales*. International Seminar on Virtual Acoustics, pp. 194-199.
- POMARES, J. (2004). *La "Festa" o Misterio de Elche*. Patronat del Misteri d'Elx. Elche.

- POPE, J. AND CHALMERS, A. (1999) *Multi-Sensory Rendering: Combining Graphics and Acoustics*. Technical Report. UMI Order Number: CS-EXT-1999-182., University of Bristol.
- QUEIROZ-DE-SANT'ANA, D.; TROMBETTA-ZANNIN, P. H. (2014). *Acoustic evaluation of a Baroque church through measurements, simulation, and statistical analysis*. *Canadian Acoustics*, 42(1), pp. 3-21.
- QUIRANTE, L. (1992). El espacio es cénico en la "festa d'Elx". *Miscel·lània Sanchis Guarner*. Vol. 3 pp. 29-52.
- RAMOS, A. (1971). *Historia de Elche*. Talleres Lepando. Elche.
- RECUERO M. (1987). *Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of Santo Domingo de Silos*. *Acustica*, 62, 241-248.
- RINDEL, J.H.; GADE, A.C.; NIELSEN, M.L. (2002). *The virtual reconstruction of the ancient Roman concert hall in Aphrodisias, Turkey*. The Sixth International Conference on Auditorium Acoustics, pp. 316-323.
- ROMERO, A.; DE LA CALLE, R. (2009). Música y arquitectura: la acústica en los espacios sacros de la Comunitat Valenciana. *Archivo de Arte Valenciano volumen XC*, pp. 11-32.
- SABINE, W. C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Harvard: Harvard University Press. Reimpresión Dover, 1964.
- SABINE, W.C. (1900). *Architectural acoustics*. *The American Architect and Building News*, 68.
- SCHROEDER, M.R.; GOETTLOB, D.; SIEBRASSE, K.F. (1974). *Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4), pp. 1195-1201.
- SCHROEDER, M.R. (1965). *New method for measuring reverberation time*. *Journal of the Acoustical Society of America* 37, pp. 409.
- SCHROEDER, M.R.; ATAL, B.S.; BIRD, C. (1962) *Digital computers in room acoustics*. Proc. 4th ICA, Copenhagen, M21.
- SEGURA, J.; BARBA, A.; PLANELLS, A.; CERDÀ, S.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2015). *Acústica arqueológica: reconstrucción de la Casa de la Olivera, teatro valenciano del siglo XVII*. 46º Congreso Nacional de Acústica "Tecnicaústica 2015", Valencia.
- SEGURA, J.; CERDÀ, S.; PLANELLS, A.; CATALÁ, P.; ROMERO, J.; CIBRIÁN, R.; BARBA, A.; GIMÉNEZ, A. (2014). *Utilización de parámetros psicoacústicos en la determinación del índice de confort en diferentes actividades y situaciones*.

Proceedings del 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica y Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental. pp. 436 – 442. Murcia.

SEGURA, J.; BARBA, A.; PLANELLS, A.; CERDÀ, S.; CIBRIÁN, R.; GIMÉNEZ, A. (2014). *Auralización en la iglesia de un monasterio jerónimo en ruinas*. Proceedings del 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica y Simposio Europeo sobre Ciudades Inteligentes y Acústica Ambiental. pp. 1237-1245. Murcia.

SEGURA, J.; MONTELL, R.; CERDÀ, S.; BARBA, A.; CIBRIÁN, R.; PLANELLS, A.; QUEROL, L.; CERVERA, O.; MOYA, A.; GIMÉNEZ, A. (2013). *Acústica Virtual: una herramienta para la evaluación del patrimonio histórico-arquitectónico*. Teatro de palabras: revista sobre teatro áureo, PP. 445-456.

SEGURA, J.; GIMÉNEZ, A.; ROMERO, J.; CERDÀ, S. (2011). *A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain*. Acta Acustica United with Acustica, 97(1), pp. 155-170.

SEGURA, J.; CERDÀ, S.; MONTELL, R.; LACATIS, R.; BARBA, A.; PLANELLS, A.; GIMÉNEZ, A.; ROMERO, P.; VERA, L.; FERNÁNDEZ, M. (2010). *Análisis de respuestas impulsivas en salas de audición*. 41º Congreso Español de Acústica. 6º Congreso Ibérico de Acústica. EAA Simposio europeo acústica ambiental y edificación acústicamente sostenible, pp. 57-64.

SEGURA, J.; ROMERO, J.; NAVASQUILLO, J.; GIMÉNEZ, A.; CERDÀ, S.; NAVARRO E. (2006). *Saint James' Church acoustic study for the installation of a pipe organ*. Proceedings of the Institute of Acoustics, 28(2), pp. 5-7.

SEMPERE, J. (1993). *La fiesta como tema y condición en Santa María de Elche*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

SENDRA, J.J., ZAMARREÑO, T., NAVARRO, J. ALGABA, J. (1997) *El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Sevilla.

SENDRA, J.J., NAVARRO, J. (1997) *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del Paleocristiano al Tardobarroco*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Sevilla.

SENDRA, J. J.; NAVARRO, J. (1994). *Proposals of intervention in the acoustical rehabilitation of churches*. Proceedings of Symposium on Acoustic Materials and Ultrasonic Transducers, Valencia, Spain, pp. 131-134.

SERRANO, A. (1940). *Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche*. Elche.

- SETTE, W. H. (1933). *A New Reverberation Time Formula*. Journal of the Acoustical Society of America, 4, pp. 193-210.
- SHANKLAND, R. S.; SHANKLAND, H. K. (1971). *Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome*. Journal of the Acoustical Society of America, 50, pp. 389-396.
- SILTANEN, S.; LOKKI, T.; SAVIOJA, L. (2008). *Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling*. Acta Acustica United with Acustica. Vol. 94, pp. 410-418.
- SOETA Y., SHIMOKURA R., KIM Y. H., OH SAWA T., ITO K. (2013). Measurement of acoustic characteristics of Japanese Buddhist temples in relation to sound source location and direction. Journal of the Acoustical Society of America 133(5), pp. 2699-2710.
- SOETA Y., ITO K., SHIMOKURA R., SATO S., OHSAWA T., ANDO Y. (2012). Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches. Journal of the Acoustical Society of America 131(2), pp. 1206-1220.
- STETTNER A. Y GREENBERG, D. (1989). *Computer graphics visualization for acoustic simulation*. In Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '89). ACM, New York, NY, USA, pp. 195-206.
- STEENEKEN, H.J.M., & HOUTGAST, T. (1980). *A Physical Method for measuring Speech Transmission Quality*. Journal of the Acoustical Society of America, 67, pp. 318-326.
- SUÁREZ, R.; ALONSO, A.; SENDRA, J. J. (2016). Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. Journal of Cultural Heritage, 19, pp. 567-572.
- SUÁREZ, R.; ALONSO, A.; SENDRA, J.J. (2015). *Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela*. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, Issue 2, pp. 239-243
- SUÁREZ, R.; SENDRA, J. J.; NAVARRO, J.; LEÓN, A. L. (2006). *Espacios acoplados en la mezquita-catedral de Córdoba: el sonido de los límites*. Informes de la Construcción, 58(501), pp. 23-31.
- SUÁREZ, R.; SENDRA, J. J.; NAVARRO, J.; LEÓN, A. L. (2005). *The sound of the cathedral-mosque of Cordoba*. Journal of Cultural Heritage 6(4), pp. 307-312.
- SUÁREZ, R.; SENDRA, J. J.; NAVARRO, J.; LEÓN, A. L. (2004). *The acoustics of the cathedral-mosque of Cordoba. Proposals for architectural intervention*. Acta Acustica United with Acustica, 90(2), pp. 362- 375.

- SUÁREZ R. (2002). *El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
- TAVARES, M. A. P.; RAJAGOPALAN, S.; JAGANNATH, S.; CARVALHO, A. P. (2008). *Acoustic characterization of worship ambience in Catholic churches. Old Goas Capela do Monte: a comprehensive example*. Proceedings of Inter-Noise 2008, Shanghai, China.
- TSINGOS, N., FUNKHOUSER, T., NGAN, A., AND CARLBOM, I. (2001). *Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction*. In Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques SIGGRAPH '01. ACM, New York, NY, pp. 545-552.
- UNESCO (s.f.). *El misterio de Elche*. Descargado de <http://www.unesco.org/culture/ich/es/RL/el-misterio-de-elche-00018>.
- VALLET, M.; VINCENT, B.; KARABIBER, Z.; ÇELIK, E.; ERDOGAN S. (2001). *Psycho-acoustic evaluation of sound in old Turkish Mosques*. Proceedings of 17th ICA, Rome, Italy.
- VORLÄNDER M. (2013). Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *Journal of the Acoustic Society of America*, 133, pp. 1203-1213.
- VORLÄNDER M. (2011). Models and algorithms for computer simulations in room acoustics. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 72-82.
- VORLÄNDER, M. (2008). *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer-Verlag.
- VORLÄNDER, M. (1989). *Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms combined ray tracing/imagesource algorithm*. *Journal of the Acoustic Society of America*, 86, pp. 172-178.
- WEITZE, C. A.; RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L.; GADE, A. C. (2002). The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- ZAMARREÑO, T.; ALGABA, J.; NIEVES, F. J.; GALINDO, M. (1995). Aspectos acústicos en la rehabilitación del salón de plenos del parlamento andaluz. Viabilidad de una simulación. Proceedings of TeciAcústica 95, La Coruña, Spain, pp. 7-10.
- ZAMARREÑO, T.; GALINDO, M.; GIRÓN, S. (2011). Simulación acústica y virtualización en recintos de culto. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 38-61.

ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudéjar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121, 234-250.

ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. (2008). Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudéjar-Gothic churches. *Appl. Acoust.*, 69(2), 242-254.

ZAMARREÑO, T.; SENDRA, J. J.; NIEVES, F. J.; NAVARRO, J.; ALGABA, J.; LEÓN A. L. (1996). Rehabilitación acústica de la iglesia del Carmen de Vélez-Málaga. *Proceedings of TecniAcústica 96*, Barcelona, pp. 69-72.

Índices de tablas y figuras

Índice de tablas

Tabla III.1.	Características de los modelos destinados a la simulación gráfica y acústica respectivamente.....	71
Tabla III.2.	Número de posiciones registradas por zonas para cada configuración de uso.....	77
Tabla III.3.	Niveles de dispersión y coeficientes empleados por frecuencias.....	82
Tabla III.4.	Materiales empleados en la simulación, coeficientes de absorción por frecuencias y niveles de dispersión asignados. Se muestran los porcentajes de cada material respecto al total para los modelos de culto y Misteri y las fuentes de las que se han extraído los valores.....	83
Tabla III.5.	Valores de JND para los distintos parámetros acústicos.....	86
Tabla IV.1.1.	Número de polígonos que forman los primeros modelos simples y complejos para cada una de las salas estudiadas.	94
Tabla IV.2.1.1.	Características geométricas de la Basílica de Santa María en la configuración para el culto.....	106
Tabla IV.2.1.2.	Características geométricas de las distintas zonas que componen la Basílica en la configuración para el culto.....	106
Tabla IV.2.1.3.	Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.	113
Tabla IV.2.1.4.	Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.	119
Tabla IV.2.1.5.	Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.	125
Tabla IV.2.1.6.	Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.	131
Tabla IV.2.1.7.	Correlación de los parámetros C50 y C80 con la distancia por bandas de frecuencia. En todos los casos existe diferencia estadísticamente significativa con $p < 0,001$	133
Tabla IV.2.1.8.	Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.....	140
Tabla IV.2.1.9.	Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.....	146

Tabla IV.2.1.10.	Comparación de los valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.....	148
Tabla IV.2.1.11.	Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.....	154
Tabla IV.2.1.12.	Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación.....	160
Tabla IV.2.2.1.	Características geométricas de la Basílica de Santa María en la configuración para el Misteri.....	169
Tabla IV.2.2.2.	Características geométricas de las distintas zonas que componen la Basílica en la configuración para el Misteri.....	171
Tabla IV.2.2.3.	Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	179
Tabla IV.2.2.4.	Comparación de los valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	180
Tabla IV.2.2.5.	Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	186
Tabla IV.2.2.6.	Comparación de los valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	187
Tabla IV.2.2.7.	Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	194
Tabla IV.2.2.8.	Comparación de los valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	195
Tabla IV.2.2.9.	Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	201
Tabla IV.2.2.10.	Comparación de los valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	202

Tabla IV.2.2.11.	Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	208
Tabla IV.2.2.12.	Comparación de los valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	209
Tabla IV.2.2.13.	Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	215
Tabla IV.2.2.14.	Comparación de los valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	217
Tabla IV.2.2.15.	Comparación de los valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.....	220
Tabla IV.2.2.16.	Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.	225
Tabla IV.2.2.17.	Tabla 7.9. Comparación de los valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	225
Tabla IV.2.2.18.	Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 125 a 1000 Hz.....	231
Tabla IV.2.2.19.	Comparación de los valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia para la comparación de fuentes y los 2 JND entre medida y simulación. Frecuencias de 2000 a 8000 Hz.....	232
Tabla IV.2.3.1.	Características geométricas generales de las salas para los dos usos principales.....	238
Tabla IV.2.3.2.	Comparación de los valores medios de RT medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	241
Tabla IV.2.3.3.	Comparación de los valores medios de RT medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	242
Tabla IV.2.3.4.	Comparación de los valores medios de EDT medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	245

Tabla IV.2.3.5.	Comparación de los valores medios de EDT medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	245
Tabla IV.2.3.6.	Comparación de los valores medios de C 50 medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	248
Tabla IV.2.3.7.	Comparación de los valores medios de C50 medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	249
Tabla IV.2.3.8.	Comparación de los valores medios de C 80 medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	252
Tabla IV.2.3.9.	Comparación de los valores medios de C80 medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	253
Tabla IV.2.3.10.	Comparación de los valores medios de T s medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	255
Tabla IV.2.3.11.	Comparación de los valores medios de T s medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	256
Tabla IV.2.3.12.	Comparación de los valores medios de G medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	258
Tabla IV.2.3.13.	Comparación de los valores medios de G medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	259
Tabla IV.2.3.14.	Comparación de los valores medios de STI medidos para cada uno de los usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.	261
Tabla IV.2.3.15.	Comparación de los valores medios de STI por zonas para cada uno de los usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.	261
Tabla IV.2.3.16.	Comparación de los valores medios de IACCA medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	264
Tabla IV.2.3.17.	Comparación de los valores medios de IACCA medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	265
Tabla IV.2.3.18.	Comparación de los valores medios de L F medidos para cada una de las frecuencias y usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	267
Tabla IV.2.3.19.	Comparación de los valores medios de LF medidos por frecuencias y zonas para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	268
Tabla IV.2.3.20.	Índices sintéticos parciales para cada parámetro y zona para la configuración de culto.....	269

Tabla IV.2.3.21.	Índices sintéticos por zonas y medios para la configuración de culto.....	269
Tabla IV.2.3.22.	Índices sintéticos parciales para cada parámetro y zona para la configuración del Misteri.....	269
Tabla IV.2.3.23.	Índices sintéticos por zonas y medios para la configuración del Misteri.....	265
Tabla IV.2.3.24.	Índices sintéticos de diferentes iglesias.	270
Tabla IV.2.3.25.	Área de audiencia y relación con el volumen de la sala para los dos usos principales.....	272
Tabla IV.2.3.26.	Comparación de los valores medios de RT simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	275
Tabla IV.2.3.27.	Comparación de los valores medios de EDT simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	280
Tabla IV.2.3.28.	Comparación de los valores medios de C50 simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	285
Tabla IV.2.3.29.	Comparación de los valores medios de C80 simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	290
Tabla IV.2.3.30.	Comparación de los valores medios de Ts simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	295
Tabla IV.2.3.31.	Comparación de los valores medios de G simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	300
Tabla IV.2.3.32.	Comparación de los valores medios de STI simulados, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	303
Tabla IV.2.3.33.	Comparación de los valores medios de STI simulados por zonas, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	303
Tabla IV.2.3.34.	Comparación de los valores medios de IACCA simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	307
Tabla IV.2.3.35.	Comparación de los valores medios de LF simulados por frecuencias, con la Basílica llena y vacía, para los dos usos principales. En rojo se muestran los valores que superan 1 JND de diferencia.....	312
Tabla IV.2.4.1.	Valores de los materiales y frecuencias para los que la desviación típica resultó igual o superior a 0,01.	320
Tabla IV.2.4.2.	Valores de los parámetros de la regresión de los valores del coeficiente de absorción determinados con la señal ruido blanco o sweep.	321

Índice de figuras

Figura II.1.1.	Imagen de la Basílica durante la representación del Misteri (Patronat del Misteri d'Elx, s.f.).....	11
Figura II.1.2.	Paso entre capillas mediante la perforación de los contrafuertes.....	15
Figura II.1.3.	Detalle de uno de los laterales de la nave.....	16
Figura II.1.4.	Detalle de la cornisa y bóveda del ábside.....	17
Figura II.1.5.	Transepto desde uno de los balcones.....	17
Figura II.1.6.	Órgano, situado en uno de los extremos del transepto.....	18
Figura II.1.7.	Hipótesis reconstructiva de la iglesia construida en el siglo XIV (Martínez y Martínez, 1990).....	19
Figura II.1.8.	Hipótesis reconstructiva de la iglesia construida en el siglo XVI (Martínez y Martínez, 1990).....	21
Figura II.1.9.	Fases constructivas en la Basílica de Santa María (Martínez y Martínez, 1990).....	23
Figura II.1.10.	Plano original de la sección transversal del crucero de Marceliano Coquillat (Ajuntament d'Elx, 2010).....	29
Figura II.1.11.	Construcción de la nueva cúpula (Ajuntament d'Elx, 2010).....	30
Figura II.1.12.	Plano de planta baja. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	34
Figura II.1.13.	Plano de pavimento. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	35
Figura II.1.14.	Plano de la planta superior. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	36
Figura II.1.15.	Plano de sección longitudinal. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	37
Figura II.1.16.	Plano de sección transversal. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	38
Figura II.1.17.	Plano de detalle del retablo mayor. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	39
Figura II.1.18.	Plano de detalle del órgano. Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche de Antonio Serrano en 1940 (Ajuntament d'Elx, 2010).....	40
Figura II.1.19.	Fotografías del desmontaje y reconstrucción de las bóvedas (Ajuntament d'Elx, 2010).....	40
Figura II.1.20.	Hipótesis de la representación del Misteri en la iglesia del siglo XIV (Martínez y Martínez, 1990).....	42
Figura II.1.21.	Hipótesis de la representación del Misteri en la iglesia del siglo XVI (Martínez y Martínez, 1990).....	43
Figura II.1.22.	Esquema del sistema de tramoyas para la representación del Misteri en la nave de la iglesia actual (Martínez y Martínez, 1990).....	45

Figura II.1.23.	Proyecto de restauración de la escena del Misteri de Antonio Serrano en 1940 (Sempere, 1993).....	46
Figura II.3.1.	Tiempos de reverberación óptimos (500 H z) propuestos por Beranek (1993).....	60
Figura II.3.2.	Tiempos de reverberación óptimos (500 Hz) propuestos por Knudsen y Harris (1988).....	61
Figura III.1.	Metodología de trabajo en edificios existentes.....	70
Figura III.2.	Equipos e instrumentación empleados en las medidas de parámetros in situ con micrófonos grass y multipatrón.....	74
Figura III.3.	Equipos e instrumentación empleados en las medidas de parámetros in situ con micrófonos cabeza binaural.....	75
Figura III.4.	Campaña de medidas en la Basílica con la figuración propia del culto	76
Figura III.5.	Campaña de medidas en la Basílica con la figuración propia del Misteri	76
Figura III.6.	Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica para el culto.....	78
Figura III.7.	Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica en la planta baja, para el Misteri.....	79
Figura III.8.	Posiciones de fuentes y receptores para las medidas en la Basílica en la planta superior, para el Misteri.....	76
Figura IV.1.1.1.	Modelos simples y complejos iniciales de la Catedral, el Palau de Les Arts y el Palau de la Música de Valencia.	95
Figura IV.1.2.	Modelos simples y complejos iniciales de la Basílica de Santa María.....	96
Figura IV.1.3.	Modelos simples finales de la Basílica de Santa María.....	97
Figura IV.1.4.	Modelo complejo final de la Basílica de Santa María.	97
Figura IV.1.5.	Interior del modelo complejo inicial del Misteri realizado con caras y el de culto construido con sólidos y superficies.....	99
Figura IV.2.1.1.	Fotografía interior de la Bas ílica de Santa María desde los pi es de la nave mirando hacia el altar.....	103
Figura IV.2.1.2.	Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde el crucero mirando hacia los pies de la nave.....	104
Figura IV.2.1.3.	Zonas c on c aracterísticas espac iales di ferentes que pu eden af ectar al comportamiento acústico.	105
Figura IV.2.1.4.	Imágenes del interior y el exterior del modelo acústico de la Basílica.....	107
Figura IV.2.1.5.	Diagrama de cajas del c onjunto de puntos r egistrados. Resultados de las medidas del parámetro RT por frecuencias.....	109
Figura IV.2.1.6.	Valores de RT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente, altar y cúpula.	110
Figura IV.2.1.7.	Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.	111

Figura IV.2.1.8.	Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.....	112
Figura IV.2.1.9.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro EDT por frecuencias.	115
Figura IV.2.1.10.	Valores de EDT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	116
Figura IV.2.1.11.	Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	117
Figura IV.2.1.12.	Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	118
Figura IV.2.1.13.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C50 por frecuencias.	121
Figura IV.2.1.14.	Valores de C50 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	122
Figura IV.2.1.15.	Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	123
Figura IV.2.1.16.	Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	124
Figura IV.2.1.17.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C80 por frecuencias.	127
Figura IV.2.1.18.	Valores de C80 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	128
Figura IV.2.1.19.	Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	129
Figura IV.2.1.20.	Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	130
Figura IV.2.1.21.	Correlación del parámetro C50 con la distancia a 1000Hz por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.	134
Figura IV.2.1.22.	Correlación del parámetro C80 con la distancia a 1000Hz por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.	134
Figura IV.2.1.23.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro Ts por frecuencias.....	135
Figura IV.2.1.24.	Valores de Ts promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	136
Figura IV.2.1.25.	Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	138
Figura IV.2.1.26.	Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	139
Figura IV.2.1.27.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro G por frecuencias.....	142
Figura IV.2.1.28.	Valores de G promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	142

Figura IV.2.1.29.	Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	143
Figura IV.2.1.30.	Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	144
Figura IV.2.1.31.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro STI para la configuración de culto.	147
Figura IV.2.1.32.	Valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las posiciones de fuente.	148
Figura IV.2.1.33.	Correlación del parámetro STI con la distancia por zonas para cada uno de los puntos medidos y simulados.	149
Figura IV.2.1.34.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro IACCA por frecuencias.	150
Figura IV.2.1.35.	Valores de IACCA promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	151
Figura IV.2.1.36.	Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	152
Figura IV.2.1.37.	Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	153
Figura IV.2.1.38.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro LF por frecuencias.	156
Figura IV.2.1.39.	Valores de LF promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	157
Figura IV.2.1.40.	Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	158
Figura IV.2.1.41.	Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	159
Figura IV.2.1.42.	Parámetros que superan los 2 JND de diferencia entre medida y simulación en función de la frecuencia, la posición de la fuente y la zona en la que se ubica el receptor para la configuración de culto.	162
Figura IV.2.1.43.	Diferencias entre valores medidos y simulados en términos de JND para cada parámetro y frecuencia.	163
Figura IV.2.2.1.	Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde los pies de la nave mirando hacia el altar. Autor: José David García Hernández.	167
Figura IV.2.2.2.	Fotografía interior de la Basílica de Santa María desde el crucero mirando hacia los pies de la nave.	168
Figura IV.2.2.3.	Detalle de la cúpula cubierta por la lona del cielo.	168
Figura IV.2.2.4.	Zonas con características espaciales diferentes que pueden afectar al comportamiento acústico.	170
Figura IV.2.2.5.	Imágenes del interior y el exterior del modelo acústico de la Basílica para el Misteri.	173
Figura IV.2.2.6.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro RT por frecuencias.	175

Figura IV.2.2.7.	Valores de RT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	176
Figura IV.2.2.8.	Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	177
Figura IV.2.2.9.	Valores medios de RT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	178
Figura IV.2.2.10.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro EDT por frecuencias.	182
Figura IV.2.2.11.	Valores de EDT promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	183
Figura IV.2.2.12.	Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	184
Figura IV.2.2.13.	Valores medios de EDT medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	185
Figura IV.2.2.14.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C50 por frecuencias.	189
Figura IV.2.2.15.	Valores de C50 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	190
Figura IV.2.2.16.	Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	192
Figura IV.2.2.17.	Valores medios de C50 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	193
Figura IV.2.2.18.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro C80 por frecuencias.	197
Figura IV.2.2.19.	Valores de C80 promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	198
Figura IV.2.2.20.	Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	199
Figura IV.2.2.21.	Valores medios de C80 medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	200
Figura IV.2.2.22.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro Ts por frecuencias.....	204
Figura IV.2.2.23.	Valores de Ts promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	205
Figura IV.2.2.24.	Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	206
Figura IV.2.2.25.	Valores medios de Ts medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.....	207
Figura IV.2.2.26.	Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro G por frecuencias.....	211
Figura IV.2.2.27.	Valores de G promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	212

Figura IV.2.2.28. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.	213
Figura IV.2.2.29. Valores medios de G medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente.	214
Figura IV.2.2.30. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro STI	218
Figura IV.2.2.31. Valores medios de STI medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	218
Figura IV.2.2.32. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro IACCA por frecuencias.	220
Figura IV.2.2.33. Valores de IACCA promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	221
Figura IV.2.2.34. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	222
Figura IV.2.2.35. Valores medios de IACCA medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	223
Figura IV.2.2.36. Diagrama de cajas del conjunto de puntos registrados. Resultados de las medidas del parámetro LF por frecuencias.	227
Figura IV.2.2.37. Valores de LF promedio de sala medidos y simulados para cada frecuencia en función de la posición de la fuente.	228
Figura IV.2.2.38. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	229
Figura IV.2.2.39. Valores medios de LF medidos y simulados por zonas para cada una de las frecuencias y posiciones de fuente, altar y cúpula.	230
Figura IV.2.2.40. Parámetros que superan los 2 JND de diferencia entre medida y simulación en función de la frecuencia, la posición de la fuente y la zona en la que se ubica el receptor para la configuración del Misteri.	234
Figura IV.2.2.41. Diferencias en JND obtenidas en la simulación respecto a las medidas para cada uno de los parámetros analizados por zonas y frecuencias.	235
Figura IV.2.3.1. Fotografía interior de la Basílica con la configuración habitual a la izquierda, y con las estructuras que se introducen para la celebración del Misteri a la derecha.	238
Figura IV.2.3.2. Valores de RT medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.	240
Figura IV.2.3.3. Valores de EDT medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.	244
Figura IV.2.3.4. Valores de C50 medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.	247
Figura IV.2.3.5. Valores de C80 medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.	251
Figura IV.2.3.6. Valores de Ts medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.	254

Figura IV.2.3.7.	Valores de G medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.....	257
Figura IV.2.3.8.	Valores de STI medidos por puntos para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.....	260
Figura IV.2.3.9.	Valores de I ACCA medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.....	263
Figura IV.2.3.10.	Valores de LF medidos por puntos y frecuencias para los dos usos principales. Se muestran en azul los resultados para el culto y verde los del Misteri.....	266
Figura IV.2.3.11.	Distribución de la audiencia en el interior de la Basílica para los dos usos principales: culto a la izquierda y representación del Misteri a la derecha.....	271
Figura IV.2.3.12.	Valores de RT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	273
Figura IV.2.3.13.	Valores de RT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	274
Figura IV.2.3.14.	Valores medios de RT simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	277
Figura IV.2.3.15.	Valores de EDT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500.....	278
Figura IV.2.3.16.	Valores de EDT simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	279
Figura IV.2.3.17.	Valores medios de EDT simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	281
Figura IV.2.3.18.	Valores de C50 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	281
Figura IV.2.3.19.	Valores de C50 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	284
Figura IV.2.3.20.	Valores medios de C50 simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	286
Figura IV.2.3.21.	Valores de C80 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	288
Figura IV.2.3.22.	Valores de C80 simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	289

Figura IV.2.3.23.	Valores medios de C80 simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	292
Figura IV.2.3.24.	Valores de T s simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	293
Figura IV.2.3.25.	Valores de T s simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	294
Figura IV.2.3.26.	Valores medios de Ts simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	296
Figura IV.2.3.27.	Valores de G simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	298
Figura IV.2.3.28.	Valores de G simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	299
Figura IV.2.3.29.	Valores medios de G simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	301
Figura IV.2.3.30.	Valores de STI simulados por puntos para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena.....	302
Figura IV.2.3.31.	Valores de I ACCA simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	305
Figura IV.2.3.32.	Valores de I ACCA simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	306
Figura IV.2.3.33.	Valores medios de IACCA simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	308
Figura IV.2.3.34.	Valores de LF simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 125 a 500 Hz.....	310
Figura IV.2.3.35.	Valores de LF simulados por puntos y frecuencias para los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran en azul los resultados para la Basílica vacía y verde llena. Frecuencias 1000 a 4000 Hz.....	311
Figura IV.2.3.36.	Valores medios de LF simulados por frecuencias para cada zona en los dos usos principales con y sin presencia de público. Se muestran los valores para el culto vacía (azul), culto llena (verde), Misteri vacía (amarillo), Misteri llena (rojo).....	313
Figura IV.2.4.1.	Pistola de impedancia de Microflown, que incluye la fuente de emisión y sonda con sensores de presión y velocidad.	317
Figura IV.2.4.2.	Medidas de absorción in situ realizadas en el laboratorio.	318

Figura IV.2.4.3.	Comparación de los valores de la absorción de dos muestras de lana de poliéster reciclado de distinta densidad y grosor. a) 1440 g/cm ³ y 40 mm de espesor y b) 500 gr/cm ³ y 20 mm de espesor), para los tres métodos de medida considerados. En azul, P-U: método propuesto en este trabajo; en rojo, cámara reverberante; y en verde, tubo de Kundt.....	319
Figura IV.2.4.4.	Análisis de la concordancia entre los valores del coeficiente de absorción obtenido con ruido blanco y sweep mostrando en el gráfico de la izquierda los resultados según la frecuencia y en el de la derecha según el material.....	320
Figura IV.2.4.5.	Discrepancia de los valores del coeficiente de absorción en función de la frecuencia y del material absorbente.....	322
Figura IV.2.4.6.	Ilustración 1 Influencia del tamaño de muestra en el material alfombra. En azul, centro de la muestra, en rojo, a 15 cm. del borde; y en verde, a 5 cm. del borde.....	323
Figura IV.2.4.7.	Ilustración 2 Influencia del tamaño de muestra en el material aluminio. En azul, centro de la muestra, en rojo, a 15 cm. del borde; y en verde, a 5 cm. del borde.....	323
Figura IV.2.4.8.	Influencia del sistema absorbente. Se muestra en azul la absorción de la espuma, en rojo la absorción de las muestras con espuma detrás y en verde la absorción de las muestras sin la espuma.....	324
Figura IV.2.4.9.	Termografía de una de las paredes del Paraninfo de la UPV.....	325
Figura IV.2.4.10.	Influencia del elemento no visible. Resultados de las medidas de absorción in situ coincidiendo con una canalización en el cerramiento.	326
Figura IV.2.4.11.	Pantalla de calibración.....	328
Figura IV.2.4.12.	Pantalla de resultados. El software proporciona la curva de valores de absorción por frecuencias.	329
Figura IV.2.4.13.	Posiciones de registro de las medidas de absorción in-situ. Se muestran en verde las medidas tomadas en el mármol del pavimento y el azul las tomadas en las paredes de piedra.....	330
Figura IV.2.4.14.	Campaña de medidas de absorción in situ.....	331
Figura IV.2.4.15.	Resultados de las medidas de absorción in situ para los dos materiales predominantes en la Basílica por bandas de frecuencia. Para cada banda de frecuencia se muestran por separado los resultados de las tres medidas repetidas.	332
Figura IV.2.4.16.	Valores medios de los coeficientes de absorción medidos y los empleados en la calibración del modelo y posterior simulación para la piedra de las paredes y el mármol del pavimento, para cada banda de frecuencias.	333
Figura IV.2.4.17.	Comparación del tiempo de reverberación medido (en negro) con la estimación del tiempo de reverberación que se obtendría al simular empleando los valores medios de absorción obtenidos in situ (en rojo). Se muestran también los valores teóricos según las fórmulas de Sabine y Eyring. Fuente: CATT Acoustics.....	333
Figura IV.3.1.	Ejemplos de texturas empleadas en el modelo de la Basílica de Santa María.....	338
Figura IV.3.2.	Modelo detallado de la Basílica de Santa María previo a la aplicación de materiales, texturas e iluminación y a la inserción de mobiliario y objetos.....	340

Figura IV.3.3.	Modelo detallado de la Basílica de Santa María una vez aplicadas las texturas de los muros, pilares y bóvedas de piedra, las vidrieras y las pechinas e insertados los bancos.....	341
Figura IV.3.4.	Modelo detallado de la Basílica de Santa María una vez aplicadas las texturas de los muros, pilares y bóvedas de piedra, las vidrieras, pechinas, pavimento y balcones, e insertados los bancos y algunos elementos decorativos de las capillas.....	342
Figura IV.3.5.	Evolución del proceso de texturización del ábside y los distintos elementos que lo componen, entre los que destaca el tabernáculo.	344
Figura IV.3.6.	Textura a aplicar en la parte superior del retablo mayor.	345
Figura IV.3.7.	Imagen virtual de la Basílica de Santa María vista desde el crucero hacia los pies de la nave.....	346
Figura IV.3.8.	Imagen virtual de la Basílica de Santa María con el andador, tribunas y cadafal. Vista desde la nave hacia el altar mayor.....	347
Figura IV.3.9.	Ejemplos de integración de otros modelos en los dos entornos trabajados: cave (arriba) y powerwall (abajo).	350
Figura IV.4.1.	Proceso de grabación del Misteri d'Elx en la sala de ensayo con los cantores y la escolanía.....	356
Figura IV.4.2.	Planta y sección de la sala en la que se realizaron las grabaciones y ubicación de la retícula y micrófonos dentro de la misma.	357
Figura IV.4.3.	Esquema de la distribución de la retícula, cantores y micrófonos para la grabación.....	358

