



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA II

ACOUSTICS OF LARGE PLACES OF WORSHIP

ACÚSTICA DE GRANDES RECINTOS DE CULTO

Author / Autor

C. Lidia Álvarez Morales

PhD Dissertation / Tesis doctoral

Supervisors / Directores

Dr. Teófilo Zamarreño García

Dr. Sara Girón Borrero

Dr. Miguel Galindo del Pozo

Seville, 2016

Elaborado en el seno del grupo PAIDI TEP 130: ***Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía***, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.



“The size of a cathedral may visually provoke awe, but sound,
invisible and intangible, evokes a sense of mystery.”

Robin Hartwell.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas e instituciones que han participado en este trabajo y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo y la confianza que me han prestado.

Quiero empezar agradeciendo de manera especial a mis directores, Teófilo Zamarreño, Sara Girón y Miguel Galindo, el haberme dado la oportunidad de adentrarme en el mundo de la investigación, en un campo tan particular como la acústica de edificios patrimoniales. Gracias por enseñarme todo lo que sé sobre acústica de salas, por vuestra dedicación, por estar siempre dispuestos a ayudarme, y por valorar desde el primer día mi trabajo, pero sobre todo, por animarme y alentarme en cada una de las fases de la investigación. Ha sido un privilegio poder contar vosotros tanto en el ámbito académico como en el personal.

Asimismo, deseo expresar mi agradecimiento a Francesco Martellotta, profesor del *Politecnico di Bari*, y a Mariana López y Rob Toulson, investigadores de la *Anglia Ruskin University*, por permitirme realizar con ellos mis estancias predoctorales, mostrándose siempre dispuestos a resolver mis dudas y compartir sus conocimientos. Valoro mucho su hospitalidad y su contribución en este proyecto y en mi formación como investigadora.

Quiero agradecer a todos los que han participado en las sesiones de medidas en las catedrales su indispensable colaboración. Gracias por compartir conmigo la maravillosa experiencia de deambular por estos espacios sin multitudes, y por sufrir con paciencia todos los problemas técnicos que aparecían cuando parecía que todo estaba bajo control, lo que no es fácil a ciertas horas de la madrugada. En particular, gracias a José Agustín Garrido, autor de muchas de las fotografías incluidas en la tesis, por el reportaje fotográfico realizado durante varias sesiones de medición. Además quiero expresar mi más sincera gratitud a los responsables y a todo el personal de las catedrales, por el permiso para realizar las medidas y el buen trato recibido.

A todos mis compañeros de los departamentos de Física Aplicada II y Construcciones Arquitectónicas I, por tratarme como una más desde el primer día; y por supuesto a todos mis compañeros del grupo de investigación TEP130, porque este trabajo no hubiese sido posible de no desarrollarse dentro de un grupo como este.

Entre mis compañeros tengo que destacar a Alicia Alonso, compañera y amiga, comenzamos juntas esta etapa y hemos aprendido mucho trabajando codo con codo en este proyecto desde el principio; a Miguel Ángel Campano, por promover el café de la tarde, y demostrar que más que hacerte perder tiempo, en ocasiones te da la vida; a Carmen Muñoz, compañera de fatigas y pleitos, juntas de papeleo hasta el último día; a Aureliano Gómez, por su ayuda y consejos en el laboratorio; y a Ángel Álvarez y Pedro Bustamante, por su buen humor, y por ser siempre los primeros en ofrecer su ayuda para lo que se tercie, por apuntarlos a todo.

También me gustaría agradecer a Lesley Burridge su ayuda y su cariño, nadie más puede hacer que ir a clase sea tan útil y divertido al mismo tiempo.

Le debo un agradecimiento muy especial a Sheila López, buenísima amiga, el mayor apoyo que he tenido, gracias por soportar mis nervios y mis quejas, por tus valiosos consejos, y sobre todo por las risas que han hecho que la hora de comer se haya estirado hasta más de lo permitido en algunas ocasiones.

A mis *telecas*, por valorarme tanto y hacerme sentir que cuento con vosotras aun estando a cientos de kilómetros de distancia.

A mi familia, porque sin ellos nada sería igual y todo sería más difícil. Gracias por apoyar todas mis decisiones y enseñarme la importancia de acabar lo que uno empieza.

Y a Ezi, por ser como es, por ser paciente, y apoyarme en todo siempre, aun sin saberlo.

AGRADECIMIENTOS POR LA FINANCIACIÓN RECIBIDA

Quiero expresar mi agradecimiento por los fondos recibidos para la realización de la investigación que forma parte de mi tesis doctoral:

Este trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación, como parte del proyecto con referencia BIA2010-20523; por el Ministerio de Ciencia e Innovación, en el marco del programa Campus de Excelencia Internacional (CEI), como parte del proyecto CEI 2014/731; y por el Ministerio de Economía y Competitividad, como parte del proyecto con referencia BIA2014-56755-P.

Las estancias predoctorales realizadas en el extranjero, en el Politécnico de Bari (Italia, 2013) y en la universidad Anglia Ruskin (Reino Unido, 2015), las cuales representan una parte esencial de esta tesis, han sido posible gracias al apoyo financiero otorgado por el Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, y el Campus de Excelencia Internacional en Patrimonio, PatrimoniUN10 (CEI), respectivamente.

ACKNOWLEDGEMENT OF FINANCIAL SUPPORT

I gratefully acknowledge the financial support received towards my PhD.

This research work has been partially financially supported: by FEDER funds and the *Spanish Ministry of Science and Innovation*, as part as the project with reference BIA2010-20523; by the *Spanish Ministry of Science and Innovation*, in the context of the *Campus of International Excellence* (CEI) program as part of the project CEI 2014/731; and by the *Spanish Ministry of Economy and Competitiveness*, as part as the project with reference BIA2014-56755-P.

The predoctoral research periods spent abroad at the *Politecnico di Bari* (Italy, 2013) and at the *Anglia Ruskin University* (UK, 2015), which represent an essential part of this thesis, have been made possible with the financial support granted by the *Institute of Architecture and Building Science of the University of Seville* (IUACC), and the *Campus of International Excellence in Heritage, PatrimoniUN10* (CEI), respectively.

RESUMEN

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) ha reconocido el sonido como parte importante de nuestro patrimonio cultural intangible, y ha identificado su preservación como una prioridad, considerando el fuerte impacto social, cultural y económico de las actividades de investigación relacionadas con el patrimonio inmaterial.

Esta tesis doctoral, que se enmarca en el proyecto nacional de investigación "*La acústica de las catedrales: una contribución científica para la recuperación del patrimonio cultural*", se centra en el estudio, la conservación y la difusión del patrimonio acústico de los lugares de culto más emblemáticos de nuestra región: las catedrales andaluzas, extendiendo tanto la metodología aplicada, como los resultados de dicha investigación, a otros grandes lugares de culto. La muestra elegida para este trabajo de investigación consiste principalmente en las catedrales andaluzas más representativas desde el punto de vista arquitectónico, cultural y turístico: las catedrales de Cádiz, Córdoba, Granada, Jaén, Málaga y Sevilla.

Se requiere un enfoque multidisciplinar para la caracterización acústica detallada de estos espacios históricos. La metodología aplicada se basa en la medición de las respuestas impulsivas monoaurales y biaurales (RIs) en determinadas combinaciones de posición de fuente y receptor, asociadas a los diversos usos litúrgicos y culturales de cada una de las seis catedrales estudiadas. Con el fin de garantizar la fiabilidad de la adquisición, el procesamiento y el análisis de los datos registrados, se realizó un estudio comparativo exhaustivo de los resultados obtenidos utilizando cuatro herramientas software diferentes. Dicha metodología incluye además, la predicción del comportamiento acústico de catedrales a través de respuestas de impulso simuladas en modelos virtuales, los cuales son previamente validados utilizando como referencia las RIs medidas. Los parámetros acústicos objetivos y los atributos subjetivos fueron analizados desde el punto de vista físico, arquitectónico y cultural, en las diferentes zonas de congregación/audiencia diferenciadas teniendo en cuenta las áreas de uso previamente definidas y/o la visibilidad determinadas por los mapeados generados para cada posición de la fuente sonora.

Los modelos virtuales se utilizaron para evaluar la acústica de los grandes recintos de culto desde una perspectiva histórica, analizando el efecto de la ocupación en el ambiente acústico del espacio, y la influencia, tanto de la posición de la fuente sonora como de su orientación, en las condiciones de escucha durante la liturgia celebrada al estilo tradicional (Misa Tridentina). Seis iglesias católicas históricas (cinco italianas y una española) de diversos tamaños y tipologías se incluyeron en dicho estudio.

Esta tesis doctoral no sólo incrementa el patrimonio inmaterial de las catedrales caracterizadas de forma individual a través del registro de sus RIs, sino que también proporciona nuevos y valiosos conocimientos científicos sobre la acústica de uno de los grupos de edificios patrimoniales más importantes de Europa, destacando las singularidades arquitectónicas de las catedrales españolas.

ABSTRACT

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) recognises sound as part of our intangible cultural heritage, and identifies its preservation as a priority, considering that activities on heritage science and/or cultural heritage research to have a strong social, cultural, environmental and economic impact.

This doctoral thesis, which is framed within the national research project "*Acoustics of cathedrals: a scientific contribution for the recovery of cultural heritage*", focuses on the study, preservation and dissemination of the acoustical heritage of the most representative places of worship of our region, Andalusian cathedrals, and extends the applied methodology and the research findings to other large places of worship. The sample chosen for this research work involves the most representative Andalusian cathedrals from an architectural, cultural and touristic point of view: the cathedrals of Cadiz, Cordoba, Granada, Jaen, Malaga, and Seville.

A multidisciplinary approach was required for the detailed acoustic characterisation of these historical spaces. The methodology applied was based on measuring the monaural and binaural room impulse responses (RIRs) for certain source-receiver combinations, which are associated with the various liturgical and cultural uses of each of the six cathedrals studied. In order to ensure the reliability of the acquisition and processing of measured data, as well as that of the analysis of results, a comparative study of the results obtained by using four different acoustic software tools, was performed. Additionally, the acoustic behaviour of cathedrals is predicted through simulated room impulse responses by using virtual models, previously validated by using measured RIRs as a reference, so that objective parameters and subjective attributes could be analysed at differentiated congregant/audience zones while taking into account the areas of visibility determined by simulation mappings for each source position.

Furthermore, acoustic virtual models were employed to assess the effect of occupancy by the congregation and of both the source position and its orientation during the liturgy when Mass was celebrated in the traditional style (Tridentine Mass). Six historical Catholic churches (five Italian and one Spanish) varying in size and typology were included in the study.

Not only does this doctoral thesis increase the intangible heritage of a characterised cathedral individually through the registration of its RIRs, but it also provides new valuable scientific knowledge on the acoustics of one of the most important groups of heritage buildings of Europe, and highlights the singularities of Spanish cathedrals.

CONTENTS

Chapter 1: Introduction	1
1.1. Introduction.....	3
1.2. Background of the research group on the topic	4
1.3. Overview of worship acoustics.....	9
1.4. Research questions and primary aims	13
1.5. Research methodology and approach	14
1.6. Research contributions and innovative aspects of the research work	16
1.7. Thesis structure	16
References in chapter 1.....	19
Chapter 2: Acoustic characterisation by using different room acoustics software tools: A comparative study	29
2.1. A brief introduction.....	31
2.2. Description of the methodology.....	32
2.2.1. Experimental procedure	32
2.2.2. Processing of RIRs	37
2.2.2.1. Choice of the exchange format of the room impulse responses.....	38
2.2.3. Analysis procedure.....	38
2.3. Results and discussion	40
2.3.1. Measurement repeatability.....	40
2.3.2. Individual analysis: Acoustic characterisation with different measurement software tools	43
2.3.2.1. Concordance between the four measurement systems. Statistical analysis	44
2.3.2.2. General analysis of the discrepancies. Mean values.....	53
2.3.3. Crossed analysis: Acoustic characterisation with different measurement software tools by processing the same set of RIRs	58
2.3.3.1. Concordance between the four processing systems. Statistical analysis of the discrepancies	58
2.3.3.2. General analysis of the discrepancies. Crossed analysis.....	67
2.3.3.3. Results obtained with the control system (MLSSA).....	70
2.4. Summary and conclusions.....	71
References in chapter 2.....	75

Chapter 3: A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga.....	77
3.1. A brief introduction.....	79
3.2. Description of the methodology.....	81
3.2.1. Experimental measurements	81
3.2.1.1. Integrated impulse response method	81
3.2.1.2. Measurement positions.....	86
3.2.1.3. Electroacoustic measurement chain.....	88
3.2.2. Acoustic simulation	92
3.3. Application to the Cathedral of Malaga	95
3.3.1. Description of the Catholic Cathedral under study	95
3.3.1.1. Construction process	95
3.3.1.2. Description of the interior of the cathedral.....	96
3.3.1.3. Measurement session. Characterised positions.....	99
3.3.1.4. Measurement session. Environmental conditions.....	102
3.3.2. Results and discussion	103
3.3.2.1. Experimental results.....	104
3.3.2.2. Simulation results.....	108
3.3.2.3. Comparison between experimental and simulated results	115
3.3.2.4. Simulation mappings	118
3.4. Conclusions.....	120
References in chapter 3.....	122
Chapter 4: Acoustic environment of Andalusian cathedrals	127
4.1. Introduction.....	129
4.2. Brief description of the cathedrals studied	131
4.3. Considerations on the common experimental methodology	135
4.4. Acoustics of Andalusian cathedrals: Results and discussion	140
4.4.1. Cathedrals' reverberation time	140
4.4.2. Subjective aspects of acoustic parameters in cathedrals	142
4.4.3. Comments on acoustic data	144
4.4.4. Acoustic energy relations in Andalusian cathedrals	150
4.4.5. Overall acoustic indices in the Andalusian Cathedrals.....	153
4.5 Conclusions.....	160
References in chapter 4.....	162

Chapter 5: A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches.....	167
5.1. A brief introduction.....	169
5.2. Description of the methodology applied	170
5.2.1. Surveyed churches	170
5.2.2. On site measurements.....	172
5.2.3. Simulation of unoccupied conditions	173
5.2.4. Simulation of occupied conditions.....	177
5.3. Results.....	178
5.3.1. Effects of the occupancy	178
5.3.2. The effect of source position	183
5.4. Conclusions.....	188
References in chapter 5.....	190
Chapter 6: Summary and conclusions	193
6.1. Summary and conclusions.....	195
6.2. Direction of further research.....	205
Bibliography	207

Appendix 1: Technical reports of the Andalusian cathedrals

Appendix 2: Initial 3D models created to simulate the acoustics of large places of worship

Appendix 3: Using 3D sound field information as an instrument to improve the accuracy of virtual acoustic models

Appendix 4: Virtual acoustic reconstruction of the church of Il Gesú in Rome: a comparison between different design options

Appendix 5: Preliminary research published in several conferences

Appendix 6: List of publications

LIST OF FIGURES

Figures in chapter 1

Figure 1.1. Theatre El Carmen (Velez-Malaga) after the refurbishment: (a) ground plan; (b) interior view from the stage; and (c) interior view from the back of the setting area. (Alda F., (1995), http://www.juntadeandalucia.es)	5
Figure 1.2. Santa Marina church (Seville): (a) ground plan with source and receiver points [28]; (b) simulation model [28]; (c) simulated echograms at position 15 in the central nave [21]; and (d) definition, clarity, and RASTI versus source-receiver distance [26].....	6
Figure 1.3. The Roman theatre of the archaeological site of Italica (Seville): (a) measured and simulated values of reverberation time and early decay time; (b) simulation model [56].....	8
Figure 1.4. Research methodology and approach.....	15

Figures in chapter 2

Figure 2.1. Auditorium of the School of Architecture of Seville: (a) View of the podium and the audience area; (b) marks for the locations of the receivers in the audience seats.	33
Figure 2.2. Ground plan of the enclosure (dimensions in m), in which the positions of the source (S1 and S2) and receptors (R1 to R15) are shown.	33
Figure 2.3. Photo archive, pictures of the measurement session: (a) Sound source at position S1 and dummy head at R2; (b and c) sound source at S2 and dummy head at R10 and R1, respectively; (d) set-up for measuring the calibration signal; (e) multipattern microphone at R9; (f) laptops with the measurement software tools.....	34
Figure 2.4. Hardware used and outline of connections.	35
Figure 2.5. Flowchart of the comparative process: individual and crossed comparison.	37
Figure 2.6. Mean variations of standard deviation found in each parameter, in terms of JNDs, when taking several measurements at the same point with each system.	41
Figure 2.7. Means of relative error (%) estimated for each parameter with each software tool at all frequency bands for the repeatability study.	42
Figure 2.8. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software B. Individual comparison.	46
Figure 2.9. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software C. Individual comparison.....	47
Figure 2.10. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software D. Individual comparison.....	48

Figure 2.11. Regression lines comparing parameter values measured with software B with those measured with software C. Individual comparison.....	49
Figure 2.12. Regression lines comparing parameter values measured with software B with those measured with software D. Individual comparison.....	50
Figure 2.13. Regression lines comparing parameter values measured with software C with those measured with software D. Individual comparison.....	51
Figure 2.14. Spatially averaged values calculated with each system (individual comparison) as a function of frequencies, for the acoustic parameters: T_{30} , EDT, T_S , C_{80} , D_{50} , G , L_J , J_{LF} , IACC _E and IACC _L	56
Figure 2.15. Spatially averaged spectral values calculated with each software tool for C_{50} , C_{80} , G , and IACC _E	57
Figure 2.16. Mean differences found between spectrally averaged values of the acoustic parameters calculated with each software tool compared point-by-point (individual comparison). The error bars represent the standard deviation of these averages.	58
Figure 2.17. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software B. Crossed comparison.....	60
Figure 2.18. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software C. Crossed comparison.....	61
Figure 2.19. Regression lines comparing parameter values measured with software A with those measured with software D. Crossed comparison.....	62
Figure 2.20. Regression lines comparing parameter values measured with software B with those measured with software C. Crossed comparison.....	63
Figure 2.21. Regression lines comparing parameter values measured with software B with those measured with software D. Crossed comparison.....	64
Figure 2.22. Regression lines comparing parameter values measured with software C with those measured with software D. Crossed comparison.....	65
Figure 2.23. Spatially averaged values calculated with each system (crossed comparison) as a function of frequencies, for the acoustic parameters: T_{30} , EDT, T_S , C_{80} , D_{50} , G , L_J , J_{LF} , IACC _E and IACC _L	69
Figure 2.24. Mean differences found between spectrally averaged values of the acoustic parameters calculated with each software tool compared point-by-point (crossed comparison). The error bars represent the standard deviation of these averages.....	70

Figures in chapter 3

Figure 3.1. Flow chart of the methodology applied for the acoustic characterisation.	81
---	----

Figure 3.2. (a) Room impulse response, RIR; and (b) energy time curve, ETC, with Schroeder's integral (thick line) calculated with noise compensation. (All measured at the receiver point R3, for source S1, filtered at 1 kHz in the Cathedral of Malaga).	82
Figure 3.3. Energy decay curve estimated by means of the truncation method, while considering several percentages of noise tail for the same room impulse response: 25% (green), 50% (blue), and 75% (red).	83
Figure 3.4. EDC my means of applying the truncation method (EDCT, green), the truncation with compensation method (EDCT + C, blue), and the subtraction method (EDCS, red), for the same signal.	84
Figure 3.5. Audience/congregation areas under the influence of various source positions, which are defined in accordance with liturgical and cultural uses of the cathedrals and subdivided in separated zones of use while taking into account their spatial arrangement, which determines the source visibility.....	87
Figure 3.6. Measurement chain used for the acoustic characterisation.	88
Figure 3.7. Geographical location of "El Majuelo" (bounded by the red line).	89
Figure 3.8. Measurement session of calibration signals in "El Majuelo" park.	90
Figure 3.9. Impulse response (left); and associated spectrum (right), measured as calibration signals in the park "El Majuelo" (Configuration 3, 125°).	91
Figure 3.10. (a) Ground plan of the Cathedral of Malaga: Designed by Hernán Ruiz II (1985; Source: Ministerio de Cultura. Archivo General de Simancas. MPyD. 68-113); and (b) drawing by Antonio Ramos (1782; Source: Archivo de la Catedral de Málaga).	95
Figure 3.11. Cathedral of Malaga: (a) Geometrical data; (b) longitudinal section, along the line depicted in the ground plan, showing the height from the floor of each source; (c) ground plan with the source positions (S), the receiver points (R), the pew area in grey, and the various zones of influence of each source delimited by different colours.	97
Figure 3.12. Inner views of the Cathedral of Malaga: (a) View of the high altar; (b) panoramic view from the top of the choir; (c) choir seating. (d) detail of column, capital and stained-glass windows; (e) detail of the vaults, columns and walls of the presbytery; (f) central nave, a view from the retrochoir; and (g) organs.	98
Figure 3.13. Photo archive, some celebrations and cultural events held in the Cathedral of Malaga: (a-c) Masses and concerts with the sound source located at the high altar; (d) chorus singing in the choir; (e) organ concerts; (f); Municipal band in the retrochoir.	99
Figure 3.14. Photo archive, pictures of the measurement session in the Cathedral of Malaga. Source-receivers appearing in the pictures: (a) and (b) S1; (c) R7; (d) and (i) S4; (e) S1-R2; (f) S1-R5; (g) S2; (h) R3; and (j) S1-R1.	101
Figure 3.15. INR measured values. All reception points under the influence of each source positions are considered.	102

Figure 3.16. (a) T_{30} parameter, and (b) EDT parameter versus frequency octave bands for the various zones: Zone A, high altar; Zone B, choir; Zone C, transept and lateral high altar; Zone D, lateral choir; Zone E, retrochoir; and Zone F, ambulatory. Optimum recommended values for T_{30} and standard-error bars for EDT are also shown.....	104
Figure 3.17. (a) Spectrally and spatially averaged G; (b) spectrally and spatially averaged C_{80} ; (c) spectrally and spatially averaged J_{LF} ; and (d) averaged STI, for the various sources in each zone of use.....	105
Figure 3.18. 3D model created with SketchUp.	109
Figure 3.19. Modelling of vaults, domes, arches and columns: (a) Interior view of the upper gallery of the cathedral; (b) initial geometrical model; and (c) final simulation model.....	109
Figure 3.20. Modelling of the main nave: (a) Interior view of the main nave of the cathedral; (b) initial geometrical model; and (c) final simulation model.	110
Figure 3.21. Measured (above) and simulated (below) directional maps filtered at 2 kHz for receiver R5 with source S1, together with the image source model and the specular echogram, of the firsts 100 ms.....	112
Figure 3.22. Geometrical 3D model created to simulate the acoustic fields of the cathedral: (a) 3D view of the model with materials assigned; (b) longitudinal section; (c) cross section; (d) ground plan; and (e) three-dimensional perspective of the acoustic model.....	113
Figure 3.23. Measured and simulated spatial average versus frequency for each source position S1, S2, S3 and S5, for G , C_{80} , J_{LF} and EDT parameters (on the left) and their spatial dispersions assessed in terms of standard errors versus octave bands (on the right).	116
Figure 3.24. Percentage of receivers with absolute differences between measured and simulated values < 1 JND, between 1-2 JND, between 2-3 JND, and > 3 JND, for G , C_{80} , J_{LF} and EDT acoustic parameters, in the six octave bands and calculated for source positions S1, S2, S3, and S5.	117
Figure 3.25. Simulation mappings of the C_{80} parameter at 1 kHz, for source positions S1, S2, S3, and S5, together with the histograms associated with each mapping (relative to the area of influence marked by a solid line in each case), which show the percentage of values that belong to each class (left vertical axis) and the cumulative percentage (right-hand vertical axis).	118
Figure 3.26. Simulation mappings of the STI index, taking into account the background noise, for S1, S2, S3, and S5 source positions together with their associated histograms (relative to the influence area marked by continuous line in each case) in which the percentages of values that belong to each class are shown (left vertical axis), and the cumulative percentage (right-hand vertical axis).	119

Figures in chapter 4

Figure 4.1. Ground plan of the six cathedrals studied.	132
Figure 4.2. Interior view of the six cathedrals studied: CA, CO, GR, JA, MA, and SE.	134
Figure 4.3. Examples of the sound source positions characterised during measurement sessions: Source position at the high altar in the cathedral of Cordoba (CO_SA); source placed on the pulpit in	

the cathedral of Malaga (MA_SP); source position in the choir in the cathedral of Cadiz (CA_SC); and source position next to the organ in the cathedral of Jaen (JA_SO).....	135
Figure 4.4. Ground plan of the six cathedrals studied, including source and receiver positions used in their characterisation and the zones of use delimited in each cathedral.	136
Figure 4.5. Omnidirectional/figure-of-eight microphone (left) and dummy head (right) used during the measurement sessions.	137
Figure 4.6. Monaural and binaural room impulse responses measured at one receiver point placed in the ZC in MA cathedral when the source was located at the high altar (SA).	138
Figure 4.7. Background noise spectrum measured in all cathedrals during the measurement sessions on NCB curves.....	139
Figure 4.8. Mean impulse-to-noise ratio (INR) achieved in the cathedrals studied with the source located at the high altar (SA).	139
Figure 4.9. Spatially averaged values of the reverberation time, measured when the sound source is located at the high altar (SA), on the symmetry axes of the cathedrals.	140
Figure 4.10. Spatially averaged values of the reverberation time, measured when the sound source is located at the high altar (SA), on the symmetry axes of the temples.....	141
Figure 4.11. Correlation between the measured values of energy parameters used to assess speech clarity and the measured values of the STI, together with the subjective rating scale estimated for these spaces. All source-receiver combinations measured in the six studied cathedrals are considered.....	142
Figure 4.12. Correlation between the measured values of parameters used to assess the spatial impression and the subjective level of sound. All source-receiver combinations measured in the six cathedrals studied are considered.....	143
Figure 4.13. Acoustic parameter values, spatially and spectrally averaged, measured for each source position in the six cathedrals studied.....	146
Figure 4.14. Acoustic parameter values, spectrally averaged, measured at each receiver point for each source-receiver combination in the six cathedrals studied, as a function of source-receiver distance.....	147
Figure 4.15. Variations of acoustic parameters by comparing averaged values obtained when the source is located at the organ (SO) and at the high altar (SA) at the same receiver points.	148
Figure 4.16. C_{80m} values versus source-receiver distance in the six cathedrals studied, measured values (dots) and calculated values from the μ model (solid line) with the source located at the high altar (SA).....	150
Figure 4.17. Spectrally averaged values of energy parameters (D_{50m} , T_{sm} , and G_m) versus source-receiver distances in JA cathedral: measured values (dots) and calculated values from the μ model (solid line), for three source positions: SA (upper row), SP (middle row), and SC (lower row).....	152

Figure 4.18. Spectrally averaged measured values of: C_{80m} versus T_{Sm} ; C_{80m} versus C_{50m} ; EDT_m versus T_{Sm} ; and T_{Sm} versus C_{50m} . Their linear regression lines and coefficients are also given..... 153

Figure 4.19. Graphical representation of the calculation the partial indices for music and for speech..... 154

Figure 4.20. Overall synthetic indices for music (P_{Music}) and for speech and singing (P_{Speech}) calculated in each cathedral according to each source location. Results from Berardi and Kosala are also included..... 159

Figure 4.21. Overall synthetic indices (GI) for music, and for speech and singing, by considering all source-receiver combinations in each cathedral. Results from Berardi and Kosala are also included..... 159

Figures in chapter 5

Figure 5.1. Interior views of the surveyed churches..... 171

Figure 5.2. Ground plans of surveyed churches including source and receiver positions, represented by capital letters and numbers respectively. A* represents the position of the priest according to "old style" liturgy, and in the subsequent text will be referred as A1 when source aims at the congregation and A2 when it aims at the altar..... 172

Figure 5.3. 3D geometrical models of the churches..... 174

Figure 5.4. Measured and simulated centre time values, averaged over mid-frequency bands (500 and 1 kHz), in the six churches at each source-receiver combination. Error bands represent the just noticeable difference (JND) at each point, calculated as the 8.5% of the measured value [19]..... 176

Figure 5.5. Mid-frequency EDT values, normalized for each church by dividing by the corresponding mid-frequency T_{30} mean value, plotted as a function of normalized source-receiver distance obtained dividing actual distance by the average distance for each church..... 179

Figure 5.6. Plot of T_S values (at 1 kHz) as a function of source-receiver distance in a selection of the surveyed churches in: simulated unoccupied conditions (●), simulated occupied conditions (○), and occupied conditions calculated using unoccupied values corrected with $\Delta T_{30}/13.8$ value (▲). 181

Figure 5.7. STI values calculated for unoccupied (full symbols) and occupied (empty symbols) at each receiver point exposed to direct sound (receiver 1m not included) in each church..... 183

Figure 5.8. Simulated STI values obtained at each receiver point with the source located at the High Altar (A1 facing audience and A2 facing the Altar) and on the pulpit (D1)..... 186

Figure 5.9. Comparison of directional intensity maps calculated at 2 kHz octave band and referred to the first 50 ms after direct sound arrival, for receiver 14 in GES as a function of different source position. Time plot is also added for each map, with squared pressure plotted in arbitrary (and normalized) scale. The origin of the directional plot is always located at the source position, so that vertical plane contains both source and receiver. Capital letters are added to ease finding a correspondence between the time plot and the spatial plot..... 187

LIST OF TABLES

Tables in chapter 2

Table 2.1. Background noise spectrum in octave bands and global levels.	36
Table 2.2. Frequency bands used for spectrally averaged values and just noticeable differences (JND) of the objective room acoustic parameters.	38
Table 2.3. Evaluation of the concordance according to the Intraclass Correlation Coefficient (ICC). 39	
Table 2.4. Standard deviations found at each parameter (mean value in all frequency bands) when analysing the RIR measured at one receiver point with each software in extreme repeatability conditions, both in absolute terms and in terms of JNDs.....	40
Table 2.5. Average relative error made in measurements considering each factor separately.	41
Table 2.6. Mean values and standard deviation for those parameters whose relative error exceed the 5 percent threshold.....	43
Table 2.7. Intraclass correlation coefficient (ICC) obtained for the acoustic parameters, grouped according to the systems that calculate them. Lower limit (LL) and upper limit (UL) of the confidence interval (CI) are shown.....	44
Table 2.8. Pearson's <i>r</i> coefficient obtained for the study of the correlation between system A and the system indicated.	44
Table 2.9. Levene's test for equality of variances and ANOVA statistical significance for the study of the mean differences of the parameters as a function of the measuring system.	52
Table 2.10. Number of items of data (%) in which the parameter values measured with software tools B, C, and D differ by less than 0.5 JND (thereby considered equal), or differ by more than 1 JND (thereby considered different) when comparing with values measured with software A. Frequency bands from 125 Hz to 4 kHz and all receiver and source positions have been taken into account....	54
Table 2.11. Maximum variance found between spatially averaged values calculated for each parameter considering the four software tools (15 receiver points and 2 positions of the sound source are included). Mean values obtained by averaging the spectral results calculated with the four software tools are given as a reference. Individual analysis.	55
Table 2.12. Crossed comparison. Intraclass correlation coefficient (ICC) obtained for the acoustic parameters, grouped according to the systems that calculate them. Lower limit (LL) and upper limit (UL) of the confidence interval (CI) are shown.	58
Table 2.13. Crossed comparison. Pearson's <i>r</i> coefficient obtained for the study of the correlation between system A and the systems indicated.	59
Table 2.14. Number of items of data (%) with discrepancies greater than 1 JND depending on the grouped frequency band considered and calculated independently for each parameter and software.	66

Table 2.15. Number of items of data (%) in which the parameter values measured with software tools B, C, and D differ by less than 0.5 JND (thereby considered equal) or differ by more than 1 JND (thereby considered different) when comparing with values measured with software A. Frequency bands from 125 Hz to 4 kHz and all receiver and source positions have been taken into account. Crossed comparison.....67

Table 2.16. Maximum variance found between the spatially averaged values calculated for each parameter considering the four software tools (15 receiver points and 2 positions of the sound source are included). Mean values obtained by averaging the spectral results calculated with the four software tools are given as a reference. Crossed analysis.....68

Table 2.17. Counting of differences (%) found between parameter values calculated with MLSSA and each of the other four systems at receiver R4, considering two positions of the source and frequency octave bands from 125 up to 4 kHz.....71

Tables in chapter 3

Table 3.1. T_{30} values calculated on the EDCs estimated by means of the truncation method, while considering several percentages of noise tail for the same room impulse response.....83

Table 3.2. Zones of influence of each source position.87

Table 3.3. Calibration measurement details.91

Table 3.4. Source positions considered and their associated receivers with direct sound in the various listeners' zones.....100

Table 3.5. Background noise spectrum.102

Table 3.6. Subjective listener aspects, associated to each acoustic parameter together with subjected bands for averaged values, and just noticeable differences.103

Table 3.7. Summary of the spectral average of the acoustical parameters measured for each source.105

Table 3.8. Typical range of acoustic parameters, frequency averaged for worship spaces, with volumes greater than 25,000 m³ compared to measurements of Malaga Cathedral. Data collected from references [8, 10, 73, 74] and internal report. All data for the source in the high altar (S1)..107

Table 3.9. Synthetic indexes by Kosala [76], W , and by Berardi [77], P , calculated for all sources of the Cathedral of Malaga and for each source individually.108

Table 3.10. Spatially averaged measured reverberation time (T_{30}), for each frequency octave-band, used in the tuning process of the model, and their adjusted values. The differences are expressed in terms of JNDs.110

Table 3.11. Absorption coefficients for each frequency octave band and colour of the materials defined for the acoustic simulations.114

Tables in chapter 4

Table 4.1. General data of the cathedrals studied.....	133
Table 4.2. Zones of influence of each source position, including the cathedrals where the corresponding source position has been characterised.....	137
Table 4.3. Number of source positions and source-receiver combinations characterised in each cathedral, and number of room impulse responses analysed for their acoustic study.....	138
Table 4.4. A-weighted equivalent continuous background-noise level (LA_{eq}) registered* in each cathedral during the measurement sessions.	139
Table 4.5. Spatially and spectrally averaged values of the reverberation time (T_{30m}) in seconds (s), measured in each cathedral with the sound source placed at various positions.....	141
Table 4.6. Spatially and spectrally averaged values of the acoustic parameters measured in each cathedral, with the sound source placed at the high altar (SA).	144
Table 4.7. Spatially and spectrally averaged values of the acoustic parameters measured in each cathedral, with the sound source and the receiver points placed in the choir (SC and Zone B respectively). GR is omitted since its choir was removed from the central nave in the 20th century.	149
Table 4.8. Values of the μ parameter in the six cathedrals studied and the coefficient of determination of the adjustment.....	151
Table 4.9. Coefficient of determination (r^2) between pairs of parameters analysed. Bold values correspond to $r^2 > 0.6$	154
Table 4.10. JND values, weights, and optimal ranges for music and speech and singing of each acoustic parameter used for the calculation of the global indices of cathedrals.....	155
Table 4.11. Partial index (i) definition of each parameter (denoted by j), used for the calculation of the global indices of cathedrals for the quality assessment of music and for speech and singing..	156
Table 4.12. Spectrally and spatially averaged values of the acoustic parameters, together with their partial indices, both for music and for speech and singing, associated to each source position, as well as the overall calculation for all source positions (A), in each cathedral.....	157
Table 4.13. Synthetic indices, both for music (P_{Music}) and for speech and singing (P_{Speech}) calculated following the proposed methodology for the six cathedrals studied, both for each source position separately, and for all of the source-receiver combinations characterised (the global index including all the sources is denoted by GI).	158

Tables in chapter 5

Table 5.1. Summary of the main geometric data of each church. S_T is the total surface area S_F is the total floor area, S_{Pews} is the area covered by pews at the time of the survey, and S_{occ} is meant as the floor surface likely covered by the congregation.	170
---	-----

Table 5.2. Measured values of the acoustical parameters, spatially and spectrally averaged (according to ISO 3382 parameter-specific bands [13]), taking into account all measured source-receiver combinations.....	173
Table 5.3. Differences in terms of JND calculated between measured and predicted values of acoustical parameters averaged over the 125 Hz to 4 kHz octave bands, and taking into account all the measured source positions.....	175
Table 5.4. Summary of the mean of absorption coefficients (α_m) assigned to materials belonging to the same class in the different churches (taking into account specific variations and adaptation resulting from calibration), and the corresponding standard deviation (SD).....	176
Table 5.5. Simulated reverberation time (T_{30}) spatially averaged in each church, with and without occupation, and their differences in terms of the JND.....	178
Table 5.6. Mean values, spectrally (according to ISO 3382 parameter-specific bands) and spatially averaged, obtained both in unoccupied and in occupied conditions for each church, together with the differences in terms of JND encountered between them. For all the churches the source was located in front of the altar and all the receivers were considered.....	180
Table 5.7. Summary of average occupied-unoccupied variations in T_{30} (ΔT_{30}), average occupied-unoccupied variations in T_S values (ΔT_S), the corresponding standard deviations, and the "theoretical" occupied-unoccupied difference in T_S for a perfectly diffuse sound field resulting from T_{30} variations (simulated values only). Subscript "m" means that all values refer to mid frequencies (500 and 1 kHz).....	182
Table 5.8. STI simulated values, spatially averaged over receivers being visible from all the three source positions corresponding to the original position at the High Altar (A1 facing audience, A2 facing Altar) and pulpit (D1), together with the variations in terms of JND appearing between the different situations.....	184

LIST OF ABBREVIATIONS, SYMBOLS, AND ACRONYMS

A*	Position of the priest according to “old style” liturgy
A1	Position of the priest according to “old style” liturgy when a directive sound source aims at the congregation
A2	Position of the priest according to “old style” liturgy when a directive sound source is facing the main altar
ACC	Abbey of Chiaravalle della Colomba
a_j	Weight of each parameter used for the calculation of the global indices
ASW	Apparent source width
b[0]	y-intercept
b[1]	slope
BR	Bass Ratio
Br	Brilliance / Brightness
BSP	Basilica of San Petronio
C_{50}	Clarity calculated for 50 ms early time limit (dB)
C_{50m}	Single number frequency averaged of clarity calculated for 50 ms early time limit (dB)
C_{80}	Clarity calculated for 80 ms early time limit (dB)
C_{80m}	Single number frequency averaged of clarity calculated for 80 ms early time limit (dB)
CA	Cathedral of Cadiz
CI	Confidence interval
CO	Cathedral of Cordoba
D1	Position of the priest according to “old style” on the pulpit when a directive sound source is facing the congregation
D_{50}	Definition
D_{50m}	Single number frequency averaged of definition
EDC	Backward-integrated energy decay curve
EDCs	Backward-integrated energy decay curve (subtraction method)
EDC _T	Backward-integrated energy decay curve (truncation method)
EDC _{T+C}	Backward-integrated energy decay curve (truncation with compensation method)
EDT	Early decay time (s)
EDT _m	Single number frequency averaged of early decay time (s)
ETC	Energy-time curve

e_μ	Early reflected energy defined in the μ model
f_S	Schroeder frequency
FT	Fourier transform
G	Sound strength (dB)
GES	Church of the Most Holy Name of Jesus
GI	Global indices calculated including all the source positions
G_m	Single number frequency averaged of sound strength (dB)
GR	Cathedral of Granada
HF	High frequencies
IACC _A	Interaural cross correlation coefficient
IACC _{Am}	Single number frequency averaged of interaural cross correlation coefficient
IACC _E	Early interaural cross correlation coefficient
IACC _{Em}	Single number frequency averaged of early interaural cross correlation coefficient
IACC _L	Late interaural cross correlation coefficient
IACC _{Lm}	Single number frequency averaged of late interaural cross correlation coefficient
ICC	Intraclass Correlation Coefficient
Icl	Wearing average insulating clothing
i_j	Partial index
INR	Impulse-to-noise ratio (dB)
JA	Cathedral of Jaen
J_{LF}	Early lateral energy fraction
J_{LFm}	Single number frequency averaged of early lateral energy fraction
JND	Just Noticeable Difference
L	Length
LA_{eq}	A-weighted equivalent continuous noise level (dBA)
LC_{eq}	C-weighted equivalent continuous noise level (dBc)
L_{eq}	Equivalent continuous noise level (dB)
LEV	Listener envelopment
LF	Low frequencies
L_J	Late lateral sound level (dB)
L_{Jm}	Single number frequency averaged of late lateral sound level (dB)
LL	Lower limit
LTI	Linear time-invariant (system)

MA	Cathedral of Malaga
MF	Mid frequencies
NCB	Balanced Noise Criterion curves
$p(t)$	Instantaneous sound pressure of the impulse response (Pa)
$p_L(t)$	Instantaneous sound pressure of the lateral impulse response (Pa)
p	P value from a Chi-square score
P	Global index
P_j	Averaged values, used for the calculation of the global indices
$P_{j\text{opt}}$	Optimal values, used for the calculation of the global indices
P_{music}	Global index for music defined by <i>Berardi</i>
P_{Music}	Global index for music
PNR	Peak-to-noise ratio (dB)
P_{speech}	Global index for speech defined by <i>Berardi</i>
P_{Speech}	Global index for speech and singing
r	Correlation coefficient
R	Receiver point
r^2	Coefficient of determination
RASTI	Rapid Speech Transmission Index
RH	Relative Humidity
RIR	Room Impulse Response
S	Sound source
SA	Sound source located at the main altar
SC	Sound source located in the choir
SD	Standard Deviation
SE	Cathedral of Seville
S_F	Total floor area
SFR	Church San Francesco in Lucera
SLM	Church of Santi Martina and Luca
SNR	Signal-to-noise ratio (dB)
$(S/N)_{\text{ap}}$	Apparent signal-to-noise ratio (dB)
SO	Sound source located next to the organ
S_{occ}	Floor surface covered by the congregation
SP	Sound source located at the pulpit
S_{pews}	Area covered by pews at the time of the survey
SR	Sound source located in the retrochoir

S_T	Total surface area
STI	Speech Transmission Index
SW	Software
T_{30}	Reverberation time based on a 30 dB evaluation range (s)
T_{30m}	Single number frequency averaged of reverberation time (s)
T_s	Centre time (ms)
T_{Sm}	Single number frequency averaged of centre time (ms)
UL	Upper limit
V	Volume
W	Global index defined by <i>Kosala</i>
W	Width
ZA	Zone A (high altar or presbytery)
ZB	Zone B (choir)
ZC	Zone C (pew area in transept and sides of the high altar)
ZD	Zone D (lateral naves in the area next to the choir)
ZE	Zone E (retrochoir)
ZF	Zone F (ambulatory)
α	Significance level (%)
α_m	Mean of absorption coefficients of materials

Chapter 1: Introduction

- 1.1. Introduction
 - 1.2. Background of the research group on the topic
 - 1.3. Overview of worship acoustics
 - 1.4. Research questions and primary aims
 - 1.5. Research methodology and approach
 - 1.6. Research contributions and innovative aspects of the research work
 - 1.7. Thesis structure
-

The present chapter introduces the theoretical framework of this research project, by providing an overview of the main research questions addressed throughout the course of this work, which have been arisen on the basis of an in-depth analysis of the evolution of research on the acoustics of worship places over the years.

Its purpose is to help to better understand the context in which the research project is presented and the reasons leading to its development, including a brief review of the literature in this field, as well as to set out the specific objectives to be achieved. The methodological approach followed in this research, which is structured in three stages in order to accomplish the purpose of the investigation, is also described. Moreover, the contributions to knowledge, and suggestions for future work and further research on this topic are discussed.

Additionally, the structure of the document is described, including a brief summary of what is discussed in each chapter, in order to facilitate their reading and comprehension.

This page was left intentionally blank

1.1. Introduction

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) recognises sounds as part of our intangible cultural heritage, and identifies its preservation as a priority, in that it considers that activities focused on heritage science and/or cultural heritage research to have a strong social, cultural, environmental and economic impact.

In this context, a national research project founded by the *Ministry of Science and Innovation*, entitled "*Acoustics of cathedrals: A scientific contribution for the recovery of Cultural Heritage*" (ref. BIA2010-20523)¹ was developed during the triennium 2011-2013, within the research group *TEP-130: Acoustics, Heritage and Sustainability: Acoustics, Lighting, Optics and Energy*² of the University of Seville. The project was directly supported by the *Ministry of Culture* of Spain, with the aim of complementing the National Plan of Cathedrals with the findings of this research, and by the *Regional Council of Culture of the Junta de Andalucía*, which also showed great interest. In the context of Intangible Cultural Heritage, the project was strongly related with the *Atalaya* project³ which seeks the recovery of the musical heritage in Andalusia associated with its cathedrals. The *Atalaya* project was led by the Baroque Orchestra of Seville, which together with other non-contributory supporting organisations (EPOs), provide an important support for the project, with the indispensable support from the councils of each of the cathedrals that constitute the sample studied.

This line of research has enjoyed continuity thanks to the project "*Recovery and diffusion of intangible cultural heritage of Andalusian cathedrals through the acoustic valuation of their ephemeral architecture*" (CEI 2014/731, 2014-2015)¹, and more recently with the project "*Acoustics and virtual reality in Spanish cathedrals: Strategic innovation applied to intangible heritage towards a European cultural identity*" (BIA2014-56755-P, triennium 2015-2017)⁴, which is currently being developed.

This dissertation is directly derived from the aforementioned research projects. Specifically, the research work developed in this doctoral thesis aims to study the acoustics of large worship places, focusing on the acoustics of the Andalusian cathedrals, the group of sacred sites visited by the largest and most diverse group of people in our region. These buildings were conceived not only as places of worship, but also as places of celebration and commemoration, where, in the present days, liturgical events and also music and drama performances are held on a regular basis. Without a doubt, cathedrals form an essential part of Europe's cultural, architectural and artistic heritage, whereby their sound constitutes a major part of their architectural atmosphere and of their majestic character. For this reason, cathedral acoustics represents an aspect of Spanish cultural heritage that should be safeguarded, since it is in danger of being altered as a result of architectural deterioration and of changes that occur during restoration work. Following this general goal, this thesis is intended as valid extension in the scope of the knowledge provided by other research projects of a similar nature focused on other worship places, which mostly belong to other periods, architectural styles and/or religious orders.

¹ <http://institucional.us.es/acuscate/>

² <http://grupo.us.es/grupotep130/>

³ <http://institucional.us.es/atalaya/>

⁴ <http://grupo.us.es/acurevica/>

Such research requires a multidisciplinary approach that draws knowledge and methodologies from the fields of science, engineering, architecture, and history in order to preserve the acoustic environment of cathedrals so that their heritage character can be strengthened through the incorporation of the acoustic assessment as a new and original form of identification, thereby increasing both the scientific and historical knowledge and the digital heritage of the sites studied.

The researchers who have supported the development of this doctoral thesis are members of the research group TEP-130, a multidisciplinary group attached to the University Institute of Architecture and Construction Sciences (IUACC) of the University of Seville, which is based in the Higher Technical School of Architecture. This group, which boasts more than 30 years of experience in room acoustics, includes 36 researchers (22 of whom hold PhDs covering a wide variety of disciplines) of the Departments of Applied Physics II, Applied Physics III, and Architectural Construction I, with extensive and productive careers in research.

1.2. Background of the research group on the topic

Over recent decades, a great part of the activity developed by the research group TEP-130 of the University of Seville has been focused on heritage buildings. In particular, the research line on room and building acoustics has centred on theatre, auditorium, and church acoustics. The aforementioned topics have been developed simultaneously throughout the years, propitiating the development of a robust and reliable research methodology to deeply analyse the acoustic behaviour of a diverse range of buildings in an efficient and effective way.

Specifically, the research question proposed for this doctoral thesis has its antecedents in several research projects and investigative pieces of work on church acoustics addressed in the last 30 years.

Since the 80s, both the legislative framework and the succession of major national and regional plans for the recovery and the rehabilitation of the architectural heritage have highlighted the growing interest in this area and propitiated research in this regard. Investigations concerning this issue were also motivated by the apparent unconcern for the acoustics of worship places, where cultural events were increasingly common. Several researchers conducted detailed studies of the evolution of the acoustic conditions in the Christian churches [1, 2]. The first work on refurbishment and acoustic conditioning of churches was carried out in the late 1980s and 90s [3, 4] of which the following studies are worthy of note: the acoustic conditioning of the Renaissance church of Hospital de las Cinco Llagas (Seville) as plenary chamber of the Parliament of Andalucia [5]; the refurbishment of the old Gothic Mudejar church of El Carmen as a theatre (Velez-Malaga) (Figure 1.1) [6]; the church-auditorium of San Francisco de Baeza (Baeza, Jaen) [7]; and the church-auditoria of La Compañía de Jesús (Jerez de la Frontera, Cadiz) [8].

These pieces of work are underpinned by a common methodology, consisting, in a first step, of a previous theoretical study through classical room-acoustics formulae, followed by the outline of a series of proposals for acoustic rehabilitation to adapt the acoustic behaviour of the churches to the various uses of the space, and, finally, of the performance of in-situ measurements to assess the effectiveness of those proposals.

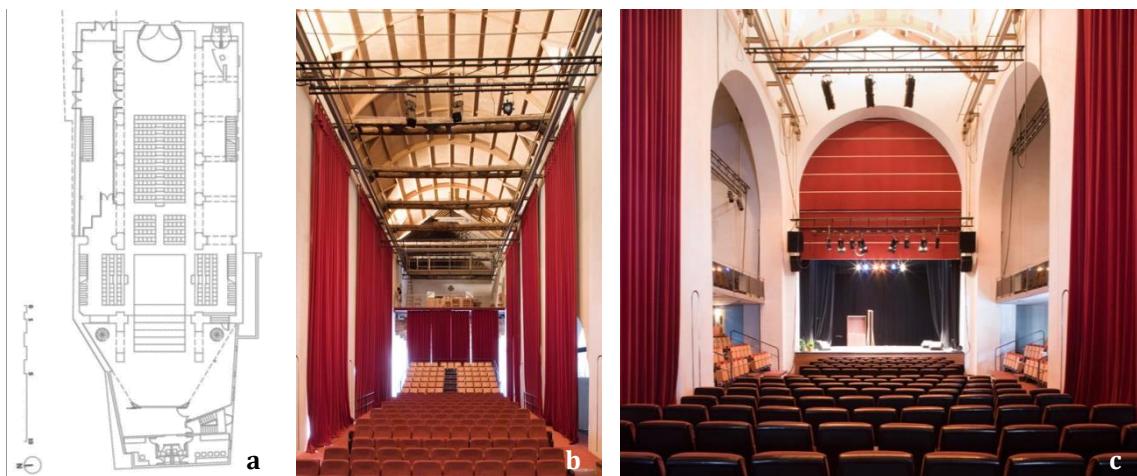


Figure 1.1. Theatre El Carmen (Velez-Malaga) after the refurbishment: (a) ground plan; (b) interior view from the stage; and (c) interior view from the back of the setting area. (Alda F., (1995), <http://www.juntadeandalucia.es>)

In order to measure the reverberation time, the integrated impulse response method is employed, by using a shot as the excitation signal, and, the speech intelligibility parameters were estimated by application of the RASTI method, whereby the *Brüel & Kjaer* equipment type 3361 was utilised. Some of the aforementioned studies were part of the Andalusian Theatres Rehabilitation Programme, in which some of the leading researchers of the group participated as acoustic consultants for more than 15 years. This research also resulted in the doctoral thesis of Ángel Luis León [9-12].

Scientific and technological advances have enabled the analysis methodology to go a step further: on the one hand, by extending the use of maximum-length sequence signals (MLS), which allowed the application of the fast Hadamard transform (FHT) in the calculation of the RIRs of a space; and, on the other hand, by improving and generalising computer simulation techniques for room acoustics. Thus, the methodology for the acoustic characterisation of churches was refined by incorporating these techniques in the research project on the acoustics of an extensive set of Mudejar-Gothic churches of Seville [13, 14]. Specifically, the *MLSSA* acoustical measurement system was used to generate the MLS excitation signals and also to register and analyse the RIRs of the churches, from which several acoustic parameters related with different subjective acoustic aspects could be calculated [15, 16].

Furthermore, working with such a large sample allowed a correlation study to be performed in order to ascertain the minimum room acoustic parameters necessary for a suitable description of this acoustic field [17]. By assuming the common typology of the churches under study, an analytical model capable of describing their interior sound field depending on the source-receiver distance was proposed [18-21]. The so-called μ model was formulated on the basis of Barron's revised theory for concert halls, through the introduction of an additional attenuation of the sound-energy density level depending on the distance, which was justified by the first reflection patterns found on those religious sites. The attenuation is quantified by the μ coefficient, which is directly deduced from the measured values of sound clarity (C_{80}).

Moreover, the experimental measurements registered in the Mudejar-Gothic churches were used for a comprehensive study of the different methods to measure speech intelligibility [22-25]. Experimental analyses on the acoustics of Mudejar-Gothic churches, was complemented through simulation techniques. Both the procedure of the adjustment of the 3D models used for the acoustic simulation, and the validation process of the simulated results, are based on a comparison between measured and simulated parameter values, in order to ensure the reliability of the simulation, which is performed by using the acoustic simulation software CATT-Acoustic [26-28] (Figure 1.2). In addition to the numerous scientific publications regarding the acoustics of Mudejar-Gothic churches, this research formed the central topic of the doctoral thesis of Miguel Galindo, who is one of the supervisors of this doctoral thesis [29].

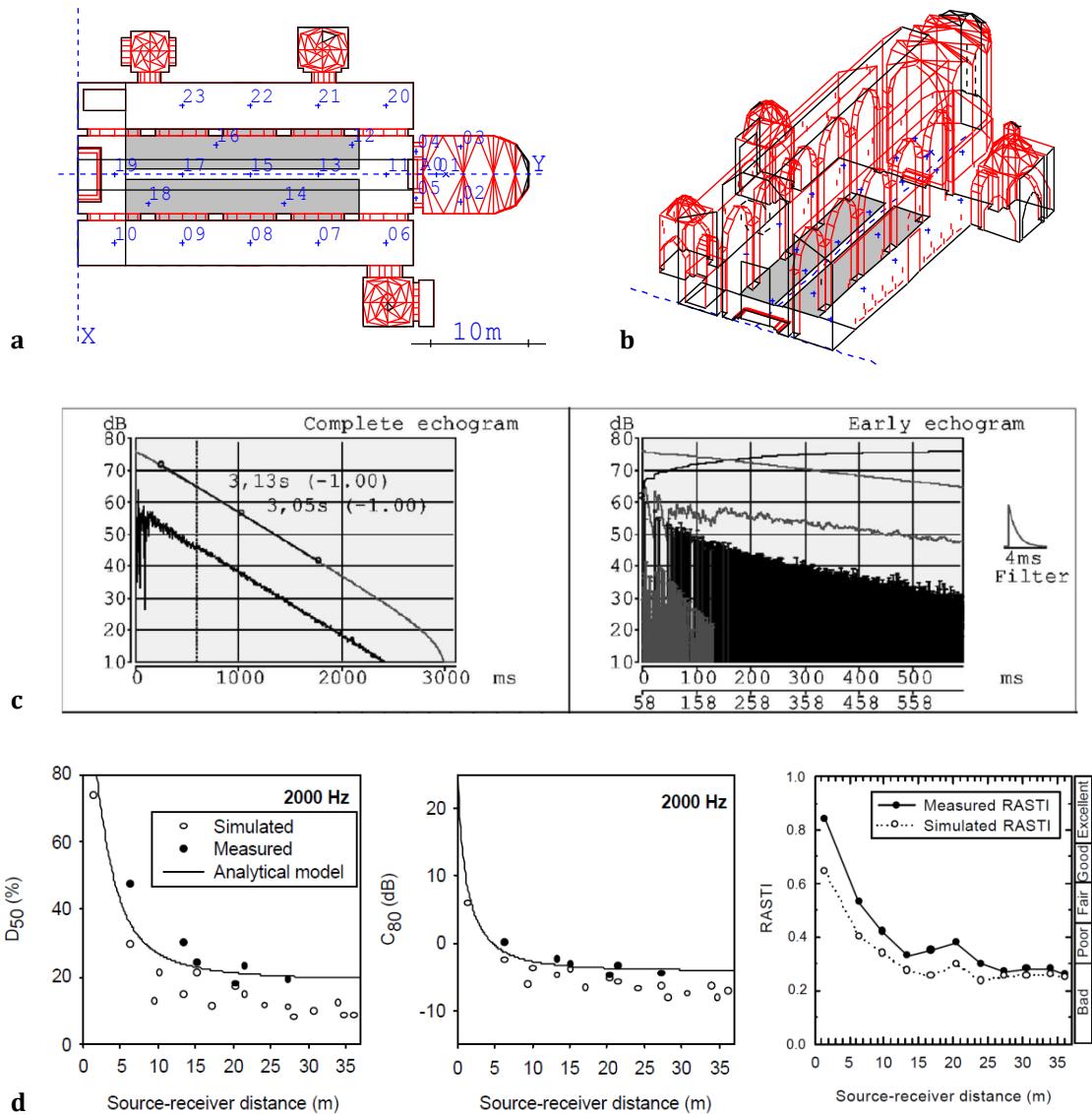


Figure 1.2. Santa Marina church (Seville): (a) ground plan with source and receiver points [28]; (b) simulation model [28]; (c) simulated echograms at position 15 in the central nave [21]; and (d) definition, clarity, and RASTI versus source-receiver distance [26].

The same simulation procedure was applied in a detailed study of the acoustics of the unique Mosque-Cathedral of Cordoba, focused on the analysis of the peculiarities of its differentiated liturgical spaces. Simulation techniques were used not only to assess the acoustic behaviour associated with each stage of its architectural transformation over the years [30, 31] but also as a powerful tool for analysing several proposals for acoustic intervention [32]. That study was part of the doctoral thesis of Rafael Suárez [33], and is a clear antecedent of the research topic proposed in this dissertation.

Despite not belonging to the research line on church acoustics, the project on the acoustic quality in concert halls and auditoria, developed in coordination with other Spanish universities during the three-year period 2003-2006, resulted in a significant improvement in the measurement procedures: exponential sweep signals were generated and analysed by using the acoustic software WinMLS-2004, which provided greater noise immunity and robustness in the acquisition and processing procedures. In addition, the equipment was purchased for the registration of the B-format impulse responses, which provide a vector description of the sound field. As part of this project, the acoustic field of 9 Andalusian auditoria was analysed through both measured and simulated RIRs [34-41] and a statistical study of the subjective response of the audience, based on in-situ surveys, was carried out to find its correlation with objective parameters [42-44]. Research on this topic is still being conducted, and several publications have recently been published in this regard [45, 46] including the doctoral thesis of a member of the research group, Pedro Bustamante [47].

The measurement technique refined in the aforementioned research projects, along with the sound field prediction procedures which have been previously described, are currently used, with small adjustments and updates, in the acoustic characterisation of heritage buildings.

The complete methodology has led to excellent results in churches varying in size, typology and architectural style [48, 49]. For instance, such methodology recently was applied for the analysis of the acoustics of religious architecture of M. Fisac [50, 51] including the assessment of several acoustic rehabilitation proposals [52], as part of the doctoral thesis of Ana M. Bueno [53]; and, more recently, in several Sevillian Baroque churches [54, 55] a research part of the dissertation (under developed) of Enedina Alberdi.

Moreover, the methodology is currently being applied to the acoustic study and reconstruction of the Roman theatres located in Spain [56, 57], which poses a new challenge when dealing with open spaces (Figure 1.3). That research work forms part of the doctoral thesis (under development) of another member of the group, Ángel Álvarez.

The growing interest in recent years in preserving sound as part of the Intangible Cultural Heritage, whose importance was highlighted by the UNESCO through the Horizon 2020 programme, has fostered the funding of 3 research projects on the acoustics of cathedrals, which constitute symbols of our culture and tradition.

The first of these research projects, in which this doctoral thesis is framed, focused on the study of the current acoustics of 6 Andalusian cathedrals. The project enabled both the adjustment and the optimisation of the methods and procedures discussed above, for their adaptation to the acoustical study of these large reverberant spaces [58-60] with the aim

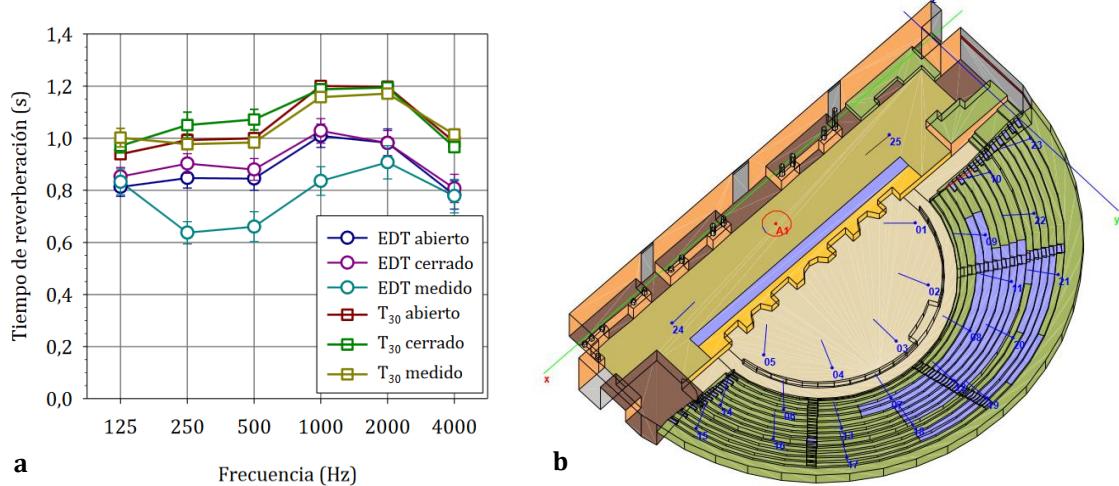


Figure 1.3. The Roman theatre of the archaeological site of Italica (Seville): (a) measured and simulated values of reverberation time and early decay time; (b) simulation model [56].

of the preservation and analysis of their acoustic environment, through the combination of experimental and simulation techniques [61-66]. This approach also allowed the study of their acoustic characteristics through the centuries [67] and the assessment of proposals to adequate their acoustic characteristics considering the multifunctional character of the space [68-71]: an issue that is being further developed by another member of the research group, Alicia Alonso, as part of her doctoral thesis.

Difficulties arose during modelling when dealing with this kind of building, due to the lack of documentation on the acoustic properties of certain materials typically found in churches, caused by the impossibility of being characterised by following traditional procedures because of their heritage character. This issue motivated a one-year research project on the acoustic valuation of the ephemeral architecture used in cathedrals for festive decorations and of those materials whose absorption coefficients present greater uncertainties [72-74] which served as a continuation of the aforementioned project.

The latest project on the acoustics of cathedrals, which is currently being developed, not only adds two Spanish cathedrals to the sample, but also incorporates virtual reality techniques to perform listening tests so that the sound impression in the interior of the temples can be subjectively evaluated. Furthermore, this research delves into the physical analysis of coupled spaces that presumably appear within the cathedrals, due to their architectural features.

Finally, it should be noted that the wide experience achieved in acoustic simulation techniques, thanks to the consecutive nature of these research projects, is also being applied in the acoustic study of cathedrals where in-situ measurements are impossible to carry out, either due to the lack of access is not possible [75, 76] or even because the temple has disappeared or undergone considerable transformation (technique used for the recovery of the acoustic heritage, which is commonly referred to as *Archeoacoustics*) [77, 78].

1.3. Overview of worship acoustics

Worship buildings represent a significant part of our history and culture, and therefore numerous disciplines, such as architecture, art, theology, and physics, have been involved in the study of such buildings over the years.

Architecture has always had a major influence in worship from aesthetic, functional and liturgical perspectives, regardless of whether the temples are churches, mosques, synagogues, or any other worship place. As lighting or textures, the acoustic environment can affect the perception of the architectural space; however, acoustics has not always been considered a relevant factor in the design and construction of worship places.

Since the pioneering studies published in the 1950s [79-81] numerous research studies on worship acoustics have striven to answer important and varied questions: What does a church sound like? What influence has its sound had on the evolution of both music and liturgy? What acoustics do listeners expect of a worship place? Do the answers to these questions depend on the assorted purposes of the space and/or the faith they serve? Are these buildings actually suitable for more than just worship? These questions have been addressed from different points of view, through clearly multidisciplinary approaches: focusing on the physical aspects of sound; delving into the cultural symbolism of the building; studying, from the artistic point of view, its influence on architecture and music and vice versa; and even considering their implication from the point of view of faith.

For more than three decades, an increasing amount of relevant research work has appear on the reverberation time and other acoustical properties (i.e. sound-pressure level, intelligibility) of several worship buildings belonging to different periods and religions, and, therefore, with different architectural features and styles [82-88]. These pieces of work, enriched by extensive research conducted on auditorium and concert hall acoustics [89-99], have generated substantial advances in understanding the interior acoustic behaviour of the various temples depending on their particular architectural characteristics.

Nevertheless, it was the great advances in technology achieved in the 90s that led to new possibilities in the field of room acoustics and architecture, especially through the evolution of computers, not only by incorporating specific software tools able to register and process room impulse responses (RIRs), which, together with more reliable and robust transducers, caused significant improvements in digital measuring techniques [100-103], but also by allowing the refinement of simulation techniques [104-111] which triggered a major technological breakthrough, that has now attained an efficiency capable of providing results in strong agreement with real acoustic conditions within enclosures.

From an experimental point of view, most of the studies on worship acoustics incorporate procedures standardised in ISO 3382-1 [112] to register and process RIRs with acceptable results despite being designed for performance spaces [15, 30, 113-116]. However, research studies have highlighted the importance of providing specifically designed guidelines and methodologies for worship spaces in terms of conducting acoustic measurements [117] and also for modelling and acoustically simulating these spaces [28, 118], mainly due to their large volumes, complex geometries, and considerably high reverberation times, and to the necessity to bear in mind their cultural influence and heritage.

It must be taken into account that RIRs describe the influence of the building on sound for a certain combination of source and receiver positions, and it is at this point where the first differences between the methodologies for the acoustic characterisation of performance and those for worship spaces appear. Since their construction, both liturgical and cultural events become part of the daily life of worship places, and therefore a great variety of types of sound sources (priests, preachers, musicians, singers...) and receivers (audience, congregants...) must be analysed depending on the use of the temples, whose position clearly differ of those commonly considered in concert halls, auditoria, and theatres. The relevance of this issue has been particularly evident in experimental campaigns conducted in large places of worship, such as cathedrals [119], and have recently been addressed through measurement and simulation techniques [59, 120-125].

The method for registering and analysing impulsive responses follows the same procedure as for other type of spaces. In fact, the same processing algorithms and the same objective parameters derived from the measured impulse responses are used in their acoustical characterisation. However, certain nuances are necessary. Bearing this fact in mind, statistical methods were applied in order to establish the orthogonality in the acoustic parameters measured in catholic churches [17, 126] with the aim of determining the most representative parameters for the acoustical characterisation of these buildings. Along these lines, several authors have proposed global indices to evaluate the acoustics of churches [127-132] and have made efforts to represent a good compromise between synthesis and communicability of their acoustic behaviour. In the calculation of these indices both objective parameters and subjective preferences are involved in an attempt to "qualify" the acoustics of the churches.

It should also be emphasised that the geometrical characteristics of these spaces, such as the presence of numerous and enormous columns, large side chapels, and huge transepts, produce "subspaces" within the main volume that have led to investigations about the influence of coupled spaces in the acoustic behaviour of spaces [31, 82, 133-136]. Additionally, with the aim of providing an insight into the understanding of early energy in churches, experimental values were used to proposed analytical models based on Barron's theory [21, 137] and/or on classic coupled-volume theory [138] capable of predicting energy decay in their interior more accurately, being also compared with the aim of generalised its use [139].

Further to describing the physical aspects of the interior sound field, the acoustic parameters defined in the standard are related to subjective aspects of the listeners. Nevertheless, both correlations between subjective and objective acoustical measures [140] and the acoustic preferences in worship places are presumably different from those found in performance spaces, since acoustic preferences can vary depending on the listener's experience as well as their cultural background [141]. Therefore, the subjective aspect is another point where great differences in the acoustics assessment of worship places and that of other spaces appear. In this regard, two research questions have been addressed:

From a scientific perspective, one of the big questions is to determine the just noticeable differences (JNDs) associated with each parameter in worship places, as they presumably differ from those values determined in performance spaces, due not only to the physical characteristics of temples, such as their high reverberation time, but also to the expec-

tations of listeners in these spaces. The use of the values of the JNDs is widespread in room acoustics, and is essential, for instance, in the quantification of the differences between measured and predicted values to validate the reliability of the acoustic models used in simulations [28, 142, 143]. Despite the importance of this subject, this issue has been addressed in Catholic churches only by Martellotta [144] through listening tests. In view of the above, JNDs established for concert halls and auditoria are commonly used in church acoustics [112, 145, 146].

The other major research question refers to the subjective preferences and recommended values of acoustic parameters, in an effort to assess whether these issues depend on the type of worship and/or the type of events that are held in these spaces. Up to this moment, subjective values used as a reference are those recommended for the favourable transmission of music and speech in concert halls and auditoriums [15, 147-149]. Although these values can offer a first overview of the acoustic quality of the space, the singular architectural characteristics of worship buildings clearly require further research in this regard, since emotional and cultural implications are completely different in worship places, and their highly reverberant character may affect the acoustic appreciation of the spaces. Several research studies have explored this issue through a variety of approaches in order to ascertain the relationship between subjective ratings and acoustical parameters, and to shed some light on the subjective preference of the listener conditions for speech and for different types of music in worship places. On-site subjective surveys have been successfully carried out in occupied churches and mosques [150-153], sometimes by using questionnaires designed for the assessment of the acoustics of concert halls [154]. However, this method is fraught with difficulties, and therefore listening tests in the laboratory are commonly used, by using auralization techniques based on the convolution of measured and/or simulated binaural impulse responses with appropriate anechoic recordings [155, 156].

Despite the aforementioned work, in order to reach the same point in the research of subjective acoustic perception in worship places as that in performance spaces, further research is needed: on one hand, it is necessary to expand the sample of temples tested, and advance further in the design of surveys by taking into consideration psychoacoustic factors present in worship places; on the other hand, development is required of a specific methodology for the execution of listening tests in churches to delve into the acoustic preferences and the spatial impression of the listeners in these spaces, since the correlation of these results with the objective parameters derived from the impulse responses can be analysed in detail. The findings of such investigations could also be useful in the establishment of specific designing recommendations for refurbishment or for new construction of worship places, since acoustic criteria are increasingly in demand in such enclosures [157].

All of the above is principally focused on the study of the current acoustic environment of worship places. But, what did they sound like in the old days? How did their architectural evolution affect their acoustics? What was the acoustic environment like in the major festivities held through their history? In this regard, the application of computer models, in addition to enabling the acoustic assessment of rehabilitation and intervention proposals prior to being implemented, which is key in heritage buildings [32, 52, 70, 158-164], allows researchers to recreate the acoustics of the temples at different points in their

history to better understand how they sounded in the past and to elucidate their acoustic changes over time. Thus, this capability offers a new approach to cultural heritage: the effects of the acoustic characteristics on the liturgy, and vice versa, can be assessed [66, 122, 125]; the acoustic impact of architectural changes and festive decorations can be analysed [72, 165-167]; and the acoustics of heritage sites which have been greatly altered through history or have even disappeared (what is called acoustic archaeology or "*Archaeoacoustics*") [71, 78, 168, 169] can also be recovered.

As dealing with any other heritage building, the difficulties encountered in modelling and accurately simulating worship buildings lie in their geometric complexity, together with the uncertainty regarding the acoustic properties of materials and singular decoration elements typically found in these buildings. Owing to their heritage character, it is difficult, if not impossible, to characterise the acoustic properties of these elements and/or building materials by following the usual procedures. Several research studies have been conducted in this respect aiming to terminate those uncertainties through different approaches: by studying the absorption coefficient of several types of pews, differing in material and shape; through Bradley's method in a reverberant chamber [170], also incorporating various degrees of occupancy [171], and corroborating the results with onsite measurements in churches with and without occupation [172]; by using commercial measuring tools based on two calculation methods (subtraction technique and the measurement of both sound pressure and velocity particles) to take on-site measurements of the absorption coefficient of textiles while considering several configurations [74]; and more recently, by using scaled-down physical models of a reverberant chamber and a church to investigate the acoustic properties of hanging textile materials [73].

Furthermore, virtual reality techniques have been established as a powerful tool for the recovery and dissemination of sound as intangible heritage of worship places. Complete immersion in the temple can be achieved through the combination of realistic visual reconstructions of the spaces with auralizations [173-175], which modify a dry stimulus (which is recorded in a reflection-free environment, such as an anechoic chamber or a studio) by using the measured/ simulated RIRs to acquire the acoustic properties of a given space, and hence, upon listening to the auralizations, one is virtually transported to that place. Speech and music pieces that were part of liturgical practices or cultural celebrations are essential to ascertaining the acoustics of these buildings; consequently, their dry recordings are crucial for the recreation of the aural experience in worship places at certain points of their history. Previous work has focused on conducting dry recordings of appropriate speech/music for auralization purposes [176, 177].

Several European research projects studying the acoustics of worship buildings as part of their heritage have been developed in recent decades. The first including virtual reality techniques was the project CAHRISMA (2000-2003), whose basic approach was the audio-visual reconstruction of Sinan's Mosques and Byzantine Churches in 3D virtual environments. Several national projects have been developed in the field since then: The Italian project "Church acoustics" (2003-2005), which investigates the acoustics of more than 30 Catholic churches located throughout Italy; the European project CAMERA , developed in the UK between 2005 and 2008, which focused on the relationship between architectural space and musical performance in the Renaissance, particularly in Italy; the UK-funded I-Hear-Too project (2009), whose aim is to improve the heritage experience through acous-

tic virtual reality; and more recently, two Spanish projects which assess the acoustic behaviour of Spanish cathedrals (2011-2013 and 2014-2017), and use virtual acoustic techniques as a tool for rehabilitation and acoustic reconstruction in heritage buildings.

1.4. Research questions and primary aims

The overriding purpose of this thesis is to study, preserve and disseminate the acoustical heritage of the most representative places of worship of our region: Andalusian cathedrals.

Analytical, experimental, and simulation techniques are applied for the acoustic characterisation in order to increase the intangible heritage associated to these historical spaces. This general goal is approached through the following specific objectives:

- Obj. 1.* To set up the equipment to ensure the high quality of the experimental technique, focusing on those software tools used to register and post-process the RIRs.
- Obj. 2.* To characterise and analyse the current acoustics of six Andalusian cathedrals from different periods, not only to preserve the sound of these cathedrals, but also to establish a procedure that considers both their multifunctional character and their particular architectural features, to be applied to other heritage buildings of similar characteristics around Europe. The acoustic characterisation involves the analysis of a set of measured RIRs (monaural, binaural and B-format) associated to certain source-receiver combinations, carefully positioned according to a preliminary study of both the architecture and the uses of each site.
- Obj. 3.* To attain the most relevant objective acoustic descriptors from the registered RIRs by analysing both their spectral and spatial behaviour in depth.
- Obj. 4.* To investigate, from the results obtained through the refined measurement techniques applied in these large places of worship, the fine structure of the density of the acoustic energy depending on the distance from the source and, therefore, the characteristics of the sound extinction curves in different receiver locations, in order to test the possible extension of the μ model.
- Obj. 5.* To design and modelling the 3D acoustic simulation models of the selected cathedrals, which will be validated by contrasting the RIRs obtained through simulations with those measured in situ. Simulated and measured acoustic parameter values will be compared and discussed in terms of their respective perceptual discrimination thresholds (JNDs, Just Noticeable Differences).
- Obj. 6.* To propose modelling strategies for better prediction of simulated RIRs in large cathedrals.
- Obj. 7.* To simulate the acoustic field in the calibrated model by using suitable acoustic simulation software, both maintaining the current state of the space in order to analyse the acoustic behaviour of the building in depth, as well as including/modifying some original characteristics in the model, for instance, to simulate the presence of a large audience.
- Obj. 8.* To assess the acoustics of several churches from an historical perspective by using simulation techniques through the analysis of the influence of the source positions

associated to the traditional Tridentine Mass (preceding the Second Vatican Council): in front of the high altar, facing both the congregation and the altar, and on the pulpit.

Obj. 9. To expand the concept and augment the attributes of the heritage character of these buildings through the incorporation of their acoustic aspects.

Obj. 10. To disseminate findings within academia and to conduct public engagement events to make intangible heritage accessible.

1.5. Research methodology and approach

Interdisciplinary approaches are essential in the preservation of sound as intangible cultural heritage. Based on a highly refined procedure as result of the extensive experience of the research group TEP-130 on room acoustics, the research methodology utilised to achieve the specific objectives listed in the previous section, consists of the following steps (Figure 1.4):

Step 1. Confirmation of the high quality of the measurement technique:

The equipment is set up and the software tool is chosen for the registration and post-process of the RIRs in order to ensure their reliability and the validity of experimental results. This step implies a specific study of the differences in the results of the room acoustic parameter values obtained from the use of several commercial software tools widely used in room acoustics to characterise the acoustic behaviour of a room.

Step 2. Historical study of the cathedrals surveyed:

Historical information is gathered together with technical details in order to document the transformation of the space over the years from an architectural point of view, as well as to document the liturgical or cultural events that take or have taken place in each cathedral; these may involve changes in the decoration or ephemeral assemblies, different types and/or locations of sound sources, and variations in the location and/or density of listeners.

Step 3. Measurements of RIRs:

At each temple, receiver/listener points are distributed throughout the congregation area (15 receiver points minimum). Sound source positions are chosen to reflect current and past uses of the space (3 source positions minimum: High altar, pulpit, and choir). For each source-receiver combination, both monaural and binaural RIRs are measured by using an omnidirectional/figure-of-eight and/or a B-format microphones and a dummy head, respectively. ISO 3382-1 is used as a reference to measure the RIRs and to calculate the acoustic parameters. As a result of this step, a technical report that summarises the acoustics of each cathedral will be completed.

Step 4. Pooled analysis:

Global analysis is performed of the experimental results of the 6 cathedrals studied through the assessment of the acoustic parameter values obtained when consider-

ing different source positions. The similarities and differences in their energy behaviour will be analysed, and the adaptation of the μ model to predict energy-based acoustic parameters in cathedrals will be tested. Additionally, an adjusted methodology will be proposed in order to calculate two global indices in an attempt to summarise the acoustic quality of large places of worship: one for music and another for speech and singing.

Step 5. Simulation models:

The information gathered about each building is used to generate computer models using a 3D modelling application (*SketchUp*). These models are then imported into the acoustic simulation software (*CATT-Acoustic*), and acoustic properties (absorption and scattering coefficients) are assigned to each surface of the model. The computer models are then calibrated using the RIRs measured on site.

Step 6. Acoustic simulations:

The adjusted simulation model and/or the initial simulation conditions of the selected temples are modified to simulate the acoustic behaviour of the space under different circumstances, for instance, under various degrees of occupancy or source directivity and orientation in relation to Tridentine liturgical conditions.

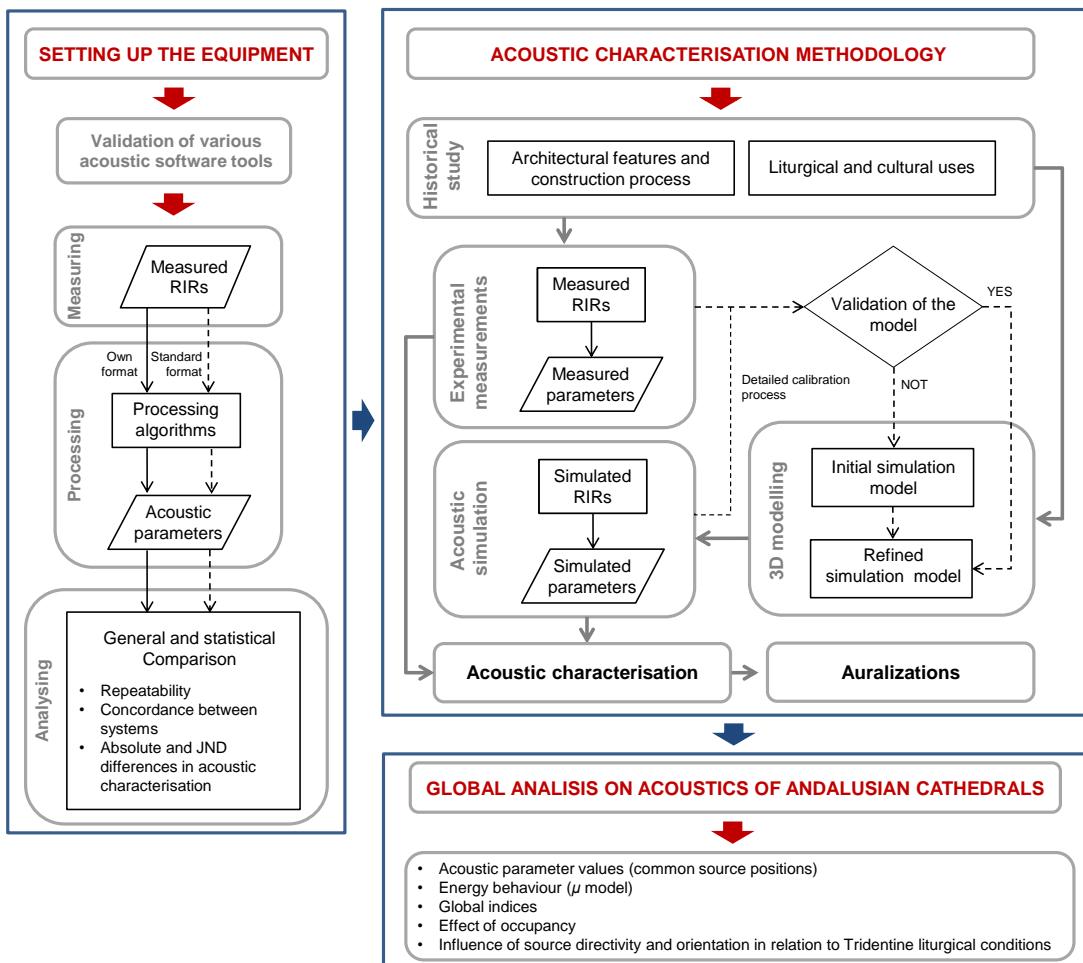


Figure 1.4. Research methodology and approach.

1.6. Research contributions and innovative aspects of the research work

This thesis highlights the importance of cathedral acoustics as an essential element of the intangible heritage of these buildings. The measured RIRs describe the acoustic experience within each cathedral, and therefore must be preserved for posterity, so that the acoustic aspects can be considered during future restoration work in the same way as any other visual or architectural property of the space.

The proposed methodology for a detailed objective characterisation of the acoustic environment of cathedrals, which takes into account their architectural features as well as their multifunctional character, through up-to-date measuring and simulation techniques, represents an interesting contribution in the research field of church acoustics. Furthermore, from a theoretical point of view, there is great interest in the existence of readily available and adequate models for the study of the extinction of sound energy in these large worship places: issue addressed in this thesis through the valuation of a possible extension of the analytical μ model.

In addition to these general aspects, it is worth noting that the technical capacity of the research team has been expanded through the set-up of the B-format acquisition equipment, which provides a more detailed description of the spatial characteristics of the acoustic field; this description has been essential for the fine tuning of the simulation models. To our knowledge, this is the first time in Spain that this technology has been applied to the study of the acoustic field within an enclosure.

Moreover, using commercial software tools to simulate the acoustic behaviour in such large spaces presents a challenge for applied acoustics research. The proposed procedure to refine the models in order to improve the accuracy of the simulated RIRs obtained from commercial software tools will offer the possibility of further investigation into the acoustic behaviour of the cathedrals, and even the possibility of going beyond the current acoustic of the temples, for instance, through recovering the RIRs associated to different historical periods to assess their acoustics in the past, thereby extending the historical knowledge on the selected cathedrals. Specifically, the acoustic study of several worship places can be broadened on the basis of the simulated results obtained from varying the acoustic characteristics of the source (location and orientation), receiver position, and degree of occupation.

Finally, the archived RIRs, both measured and simulated, in combination with dry recordings of the speech/music motifs, allow the creation of auralizations of sounds that are part of the culture and history of these buildings, thereby recuperating acoustic heritage of great value.

1.7. Thesis structure

This dissertation is structured in 6 chapters which provide a detailed description of the different stages of the research process, as well as the results and findings obtained in each part of the research work. Each chapter includes a brief introduction of the topic and a subsection with a summary of findings and conclusions reached, in order to facilitate the reading and comprehension of this thesis.

Chapter 1 introduces the theoretical basis and the background of this research together with the evolution of worship acoustics.

The definition of proper commissioning/testing/calibrating procedures of the equipment utilised to carry out the acoustic measurements is essential to ensure the reliability of the acquisition and processing of measured data, as well as of the analysis of results. *Chapter 2* outlines the strategies followed to conduct a comparative study of results obtained by using four different software tools for the acoustic characterisation of a room, in order to demonstrate that if the electroacoustic equipment meets specified requirements, has been properly installed, and complies with technical and design specifications, then there is no significant discrepancies when different software tools are used to characterise the acoustic behaviour of a room.

A detailed discussion of the methodology applied for the description of the acoustic fields of Spanish cathedrals is given in *Chapter 3*. This methodology is based on measuring the monaural and binaural room impulse responses for certain source-receiver combinations that are associated with the various uses of each cathedral. Additionally, their acoustic behaviour is predicted through simulated room impulse responses by using virtual models, so that objective parameters and subjective attributes are analysed at differentiated congregant/audience zones while taking into account the areas of visibility determined by simulation mappings for each source position. This chapter also includes a broad description of the equipment and techniques used for gathering the data of the research on the acoustics of such buildings. Furthermore, the acoustic study of the cathedral of Malaga is presented in detail as an example of the application of the proposed methodology. Through the application of this methodology, an improvement is shown in the acoustic characterisation of large places of worship, where substantial changes in the acoustic behaviour of the space can be produced depending on where the sound source is placed.

Chapter 4 describes the acoustic aspects of the 6 large cathedrals of Andalusia. Their highly reverberant environments are acoustically analysed by following the experimental methodology described in *Chapter 3*, including several sound source locations related with the uses of the space as well as differentiated listener zones. Furthermore, the μ energy model, which was initially formulated for Mudejar-Gothic churches, is tested in the studied cathedrals while considering three different source positions. Additionally, the current formulation of global indices proposed by Berardi is adjusted to summarise the acoustics of cathedrals.

Chapter 5 presents the study of the effect of occupancy due to the congregation and the effect of both the source position and its orientation during the liturgy when Mass was celebrated in the traditional style (Tridentine Mass). Six historical churches (five Italian and one Spanish) varying in size and typology, including the cathedral of Malaga, form the sample of the study. The effect of these hypotheses on the acoustical parameters is assessed by using virtual models that have previously been calibrated with reference to the current measured conditions, following the procedure described in *Chapter 3*.

Chapter 6 provides a summary of the results and the main conclusions drawn in relation to the research questions and primary aims of the thesis stated earlier in this chapter. Moreover, the innovative contributions of the study are identified, and suggestions are made regarding future research on this topic.

Furthermore, in order to complete/support all the information presented in the aforementioned chapters, the following appendices are supplied: *Appendix 1* includes the technical reports generated for the six Andalusian cathedrals, as well as a glossary which lists parameters and terms used in the characterisation, and provides their definitions and formulae; *Appendices 2 to 5* contain previous conference papers concerning the research work developed throughout this doctoral thesis; and *Appendix 6* lists the scientific publications derived from the doctoral thesis.

References in chapter 1

- [1] 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, Universidad de Sevilla, Spain.
- [2] Navarro J., Sendra J. J., Muñoz S. (2009). The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. *Appl. Acoust.*, 70(6), 781-789.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 TecniAcústica 95, La Coruña, Spain, pp. 7-10.
- [6] 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, Spain, pp. 69-72.
- [7] Sendra J. J., Navarro J., Zamarreño T., León A. L. (1999). Propuestas para la rehabilitación acústica de iglesias: El ejemplo de la iglesia de San Francisco de Baeza (España). Proceedings of IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Torremolinos, Spain, pp. 244-245.
- [8] 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.
- [9] León A. L., Navarro J., Sendra J. J. (2000). Adjustment of reverberation in the rehabilitation of theaters. Its application to the architectural patrimony of theaters in Andalusia, Spain. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(5), 2892.
- [10] León A. L. (2001). Acústica arquitectónica y patrimonio teatral en Andalucía. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- [11] León A. L., Navarro J., Sendra J. J., Zamarreño T. (2002). Acoustics and theater rehabilitation in Andalucía. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- [12] León A. L., Navarro J., Sendra J. J., Suárez R. (2005). El sonido de los teatros andaluces. Revista de historia y teoría de la arquitectura, 6-7, 214-233.
- [13] Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1998). Acoustical behaviour of churches: Mudejar-Gothic churches. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 103 (5), 2996.
- [14] Sendra J. J., Navarro J., Zamarreño T. (1999). La acústica de las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla. Colección Textos de Doctorado, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Spain.
- [15] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2005). Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(5), 2873-2888.
- [16] Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2008). Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches. *J. Sound Vib.*, 315(4-5), 1125-1142.
- [17] Galindo M., Girón S., Zamarreño T. (2008). Correlations of the acoustic fields of Mudejar-Gothic churches. *Build. Acoust.*, 15, 175-196.

- [18] Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1997). An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches (in Computational Acoustics and its Environmental Applications II, pp. 139-148, eds. Brevia C. A., Kenny J., Ciskowski R. D.). Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- [19] Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1999). Acoustics in churches (in Computational Acoustics in Architecture, pp. 133-177). Witpress, Southampton, UK.
- [20] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (1999). Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches. *Build. Acoust.* 6(1), 1-16
- [21] Zamarreño T., Girón S., Galindo M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121, 234-250.
- [22] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2000). Speech intelligibility in Mudejar-Gothic churches. *Acustica*, 86 (2), 381-384.
- [23] Zamarreño T., Galindo M., Girón S. (2001). Ruido modulado versus MLS para la medida de parámetros de inteligibilidad: Primera aproximación. *TecniAcústica 2001*, Logroño, Spain.
- [24] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2002). Comparative study of various techniques to measure speech intelligibility. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- [25] Zamarreño T., Girón S., Galindo M. (2008). Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches. *Appl. Acoust.*, 69(2), 242-254.
- [26] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2002). Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Mudejar-Gothic churches. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- [27] Girón S., Zamarreño T., Galindo M. (2007). Acoustics in Mudejar-Gothic churches. Proceedings of ISRA 2007, Seville, Spain.
- [28] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2009). Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126 (3), 1207-1218
- [29] Galindo M. (2003). La acústica en espacios religiosos católicos: Iglesias Gótico-Mudéjares. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- [30] Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2005). The sound of the cathedral-mosque of Cordoba. *J. Cult. Herit.*, 6(4), 307-312.
- [31] Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2006). Espacios acoplados en la mezquita-catedral de Córdoba: el sonido de los límites. *Inf. Constr.*, 58(501), 23-31.
- [32] Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2004). The acoustics of the cathedral-mosque of Cordoba. Proposals for architectural intervention. *Acta Acust. United Acust.*, 90(2), 362-375.
- [33] Suárez R. (2002). El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- [34] Bustamante P., Zamarreño T., Girón S., Galindo M., Sendra J. J. (2007). General acoustic characterization of the Maestranza theatre in Seville. Proceedings of ISRA 2007, Seville, Spain.
- [35] Galindo M., Girón S., Zamarreño T., León A. L. (2009). Simulación del soporte de escena en teatros andaluces. Proceedings of TecniAcústica 2009, Cadiz, Spain.
- [36] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2010). Acustica virtual del escenario de teatros de proscenio andaluces. Proceedings of TecniAcústica 2010, Leon, Spain.

- [37] Girón S., Zamarreño T., Galindo M. (2010). Experimental study of support parameters on auditorium and proscenium stages. *Acta Acust. United Acust.*, 96 (6), 1026-1042.
- [38] Garrido J. A., Zamarreño T., Girón S., Ruiz D. P. (2011). Perceived feasibility of computer-generated auralization in concert halls. *Proceedings of ISVA 2011*, Valencia, Spain, pp. 153-162.
- [39] Girón S., Zamarreño T., Bustamante P. (2012). Objective measures of spatial effects in Spanish concert halls. *Arch. Acoust.*, 37 (4), 529-547.
- [40] Garrido J. A., Zamarreño T., Girón S. (2012). Virtual model to predict the acoustic fields of the Manuel de Falla auditorium of Granada (Spain). *Appl. Acoust.*, 73(9), 921-935.
- [41] Bustamante P., Zamarreño T., Girón S. (2013). Acústica virtual del escenario multi-configurable del teatro de la Maestranza. *Proceedings of TecniAcústica 2013*, Valladolid, Spain, pp. 1473-1481.
- [42] Giménez A., Cibrián R. M., Girón S., Zamarreño T., Sendra J. J. (2011). Questionnaire survey to qualify the acoustics of Spanish concert halls. *Acta Acust. United Acust.*, 97(6), 949-965.
- [43] Giménez A., Cibrián R. M., Cerdá S., Girón S., Zamarreño T. (2014). Mismatches between objective parameters and measured perception assessment in room acoustics: A holistic approach. *Build. Environ.*, 74, 119-131.
- [44] Cerdá S., Giménez A., Cibrián R. M., Girón S., Zamarreño T. (2015). Subjective ranking of concert halls substantiated through orthogonal objective parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137, 580-584.
- [45] Bustamante P., Girón S., Zamarreño T. (2014). Simulated sound-fields in a multi-configurable auditorium. *Arch. Acoust.*, 39(3), 365-383.
- [46] Planells A., Girón S., Zamarreño T., Giménez A. (2015). Estudio experimental del soporte de escena en teatros y auditorios. *Proceedings of TecniAcústica 2015*, Valencia, Spain, pp. 1468-1476.
- [47] Bustamante P. (2016). Evaluación acústica objetiva y subjetiva en salas y teatros de Andalucía. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- [48] Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2007). Predicted and measured acoustic parameter in churches. *Proceedings of ISRA 2007*, Seville, Spain.
- [49] Espinosa D., Zamarreño T., Girón S. (2010). Acoustics of the chapel of the former Mora hospital. *Proceedings of Inter-Noise 2010*, Lisbon, Portugal.
- [50] Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2011). Simulación acústica de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz. *Proceedings of ISVA 2011*, Valencia, Spain, pp. 122-129.
- [51] Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2013). Simulación de las condiciones acústicas de tres iglesias de Fisac. *Proceedings of TecniAcústica 2013*, Valladolid, Spain, pp. 1465-1472.
- [52] Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2012). Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Arch. Acoust.*, 37, 435-446.
- [53] Bueno A. M. (2014). El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.

- [54] Alberdi E., Galindo M., León A. L., Bueno A. M. (2014). El ambiente sonoro en la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla. Proceedings of TecniAcústica 2014. Murcia, Spain, pp. 1300-1307.
- [55] Alberdi E., Galindo M., León A. L. (2015). Acústica virtual de la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla. Proceedings of TecniAcústica 2015, Valencia, Spain, pp. 1507-1514.
- [56] Álvarez A., Zamarreño T., Galindo M., Girón S. (2014). Acústica virtual del teatro romano de Itálica. Proceedings of TecniAcústica 2014, Murcia, Spain, pp. 1229-1236.
- [57] Álvarez A., Zamarreño T., Galindo M., Girón S., Bustamante P. (2015). Acústica virtual del teatro romano de Regina Turdulorum. Proceedings of TecniAcústica 2015, Valencia, Spain, pp. 1515-1522.
- [58] Zamarreño T., Galindo M., Girón S. (2011). Simulación acústica y virtualización en recintos de culto. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 38-61.
- [59] 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, *Build. Environ.*, 72, 102-115.
- [60] Álvarez-Morales L., Galindo M., Girón S., Zamarreño T., Cibrián R. M. (2016). Acoustic characterisation by using different room acoustics software tools: A comparative study. *Acta Acust. United Acust.*, 102(3), 578-591.
- [61] Álvarez-Morales L., Alonso A., Zamarreño T., Girón S., Galindo M. (2011). Virtual acoustics of the Cathedral of Malaga (Spain). Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, pp. 1475-1480.
- [62] 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, Spain, pp. 106-113.
- [63] Colomo A., Espinosa D., Zamarreño T., Girón S. (2012). Acústica de la cripta de la catedral de Cádiz, Spain. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- [64] Álvarez-Morales L., Franco A., Alonso A., Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2013). Modelo acústico virtual de la catedral renacentista de Jaén. Proceedings of TecniAcústica. 2013, Valladolid, Spain, pp. 1456-1464.
- [65] Álvarez-Morales L., Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2016.) Acoustic Environment of Andalusian Cathedrals. *Build. Environ.*, 103, 182-192.
- [66] Álvarez-Morales L., Martellotta F. (2015). A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Appl. Acoust.*, 91, 47-58.
- [67] Álvarez-Morales L., Martellotta F. (2014). Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- [68] 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.
- [69] Alonso A., Sendra J. J., Suárez R., Álvarez-Morales L. (2013). Acoustic assessment of various spatial configurations in the trascoro of the cathedral of Seville. Proceedings of ICSV 2013, Bangkok, Thailand.

- [70] 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. *J. Build. Perf. Simul.*, 7(5), 360-378.
- [71] Alonso A., Sendra J. J., Suárez R. (2014). Sound space reconstruction in the cathedral of Seville for major feasts around the main chancel. *Proceedings of Forum Acusticum 2014*, Krakow, Poland.
- [72] Alonso A., Martellotta F. (2015). The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective. *Proceedings of ICSV 2015*, Florence, Italy.
- [73] Alonso A., Martellotta F. (2015). Room acoustic modelling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *J. Build. Perf. Simul.*, in press.
- [74] 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*, Valencia, Spain, pp. 705-712.
- [75] López-Martín F. J., Álvarez-Morales L., Zamarreño T., Girón S. (2012). El sonido virtual del Panteón de Roma. *Proceedings of TecniAcústica 2012*, Evora, Portugal.
- [76] Suárez R., Alonso A., Sendra J. J. (2015). Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. *J. Cult. Herit.*, 16(2), 239-243.
- [77] Suárez R., Sendra J. J., Alonso A. (2013). Acoustics, liturgy and architecture in the early Christian church. From the *domus ecclesiae* to the basilica. *Acta Acust. United Acust.*, 99, 292-301.
- [78] Suárez R., Alonso A., Sendra J. J. (2016). Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. *J. Cult. Herit.*, 19, 567-572.
- [79] Lottermoser W. (1952). Nachhallzainen in Barckkirchen. *Acustica*, 2, 109-111.
- [80] Raes A. C., Sacerdote G. (1953). Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas. *J. Acoust. Soc. Am.*, 25, 925-961.
- [81] Keibs L., Kuhl W. (1959). Akustics der Thomaskirche in Leipzig. *Acustica*, 9, 365-370.
- [82] Shankland R. S., Shankland H. K. (1971). Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.*, 50, 389-396.
- [83] Fearn R. W. (1975). Reverberation in Spanish, English and French churches. *J. Sound Vib.*, 43(3), 562-567.
- [84] Tzekakis E. (1979). Data on the acoustics of the Byzantine churches of Thessaloniki. *Acustica*, 43, 275-279.
- [85] Lewers T. H., Anderson J. (1984). Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. *J. Sound Vib.*, 92(2), 285-297.
- [86] Recuero M. (1987). Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of Santo Domingo de Silos. *Acustica*, 62, 241-248.
- [87] Abdelazeed M. K., Hammad R. N., Mustafa A. A. (1991). Acoustics of King Abdullah mosque. *J. Acoust. Soc. Am.*, 90(3), 1441-1445.
- [88] Desarnaulds V., Bossoney S., Eggenschwiler K. (1998). Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen. *Proceedings of Fortschritte der Akustic DAGA 98*, 710-711.
- [89] Schroeder M. R. (1965). New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, 409-412.

- [90] Barron M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls—the need for lateral reflections. *J. Sound Vib.*, 15(4), 475-494.
- [91] Marshall A. H., Gottlob D., Alrutz, H. (1978). Acoustical conditions preferred for ensemble. *J. Acoust. Soc. Am.*, 64(5), 1437-1442.
- [92] Beranek L. L. (1979). Music, acoustics and architecture. RE Krieger Publishing Company, New York, USA.
- [93] Ando Y. (1985). Concert hall acoustics. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- [94] Barron M. (1984). Impulse testing techniques for auditoria. *Appl. Acoust.*, 17(3), 165-181.
- [95] Arau-Purchades H. (1988). ABC de la acústica arquitectónica. CEAC, Barcelona, Spain.
- [96] Barron M. (1988). Subjective study of British symphony concert halls. *Acta Acust. United Acust.*, 66(1), 1-14.
- [97] Barron M., Lee L. J. (1988). Energy relations in concert auditoriums I. *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 618-628.
- [98] Gade A. C. (1989). Acoustical survey of eleven European concert halls. A basis for discussion of halls in Denmark. Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark.
- [99] Barron M. (1993). Auditorium acoustics and architectural design. E&FN Spon, London, UK.
- [100] Lundeby A., Vigran T. E., Bietz H., Vorländer, M. (1995). Uncertainties of measurements in room acoustics. *Acta Acust. United Acust.*, 81(4), 344-355.
- [101] Griesinger D. (1996). Beyond MLS-Occupied hall measurement with FFT techniques. Proceedings of AES 101st Convention, Los Angeles CA, USA.
- [102] Farina A. (2000). Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. Proceedings of AES 108th Convention, Paris, France.
- [103] Fausti P., Farina A. (2000). Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *J. Sound Vib.*, 232(1), 213-229.
- [104] Vorländer M. (1989). Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1), 172-178.
- [105] Kuttruff K. H. (1993). Auralization of impulse responses modelled on the basis of ray-tracing results. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11), 876-880.
- [106] Vorländer M. (1995). International round robin on room acoustical computer simulations. Proceedings of the 15th ICA, Trondheim, Norway.
- [107] Rindel J. H. (1995). Computer simulation techniques for acoustical design of rooms. *Acoust. Aust.*, 23, 81-86.
- [108] Dalenbäck B. I. L. (1999). Verification of prediction based on randomized tail-corrected cone-tracing and array modelling. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(2), 1173.
- [109] Vorländer M., Mommertz E. (2000). Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Appl. Acoust.*, 60(2), 187-199.
- [110] Bork I. (2000). A comparison of room simulation software-The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acust. United Acust.*, 86(6), 943-956.

- [111] Rindel J. H. (2002). Modelling in auditorium acoustics. From ripple tank and scale models to computer simulations. *Revista de Acústica*, 33(3-4), 31-35.
- [112] ISO 3382-1:2009(E). *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [113] Niemas M., Sadowski J., Engel Z. (1998). Acoustic issues of sacral structures. *Arch. Acoust.*, 23(1), 87-104.
- [114] Anderson J., Bratos-Anderson J. S. (1999). St. Paul's Cathedral London, as a concert hall. Proceedings of 6th ICSV, Copenhagen, Denmark.
- [115] Magrini A., Ricciardi P. (2003). Churches as auditoria: Analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. *Build. Acoust.*, 10, 135-157.
- [116] Adel A. A. (2003). Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(3), 1505-1517.
- [117] Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P. (2008). Guidelines for acoustical measurements in churches. *Appl. Acoust.*, 70, 378-388.
- [118] Boren B., Longair M., Orlowski R. (2013). Acoustic simulation of renaissance Venetian churches. *Acoustics in Practice*, 1(2), 17-28.
- [119] Pedrero A., Ruiz R., Díaz-Chyla A., Díaz C. (2014). Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses. *Appl. Acoust.*, 85, 23-33.
- [120] 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. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(2), 1206-1220.
- [121] Montell R., Giménez A., Cerdá S., Segura J., Cibrián R. M., Barba A. (2012). Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la catedral metropolitana de Valencia. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- [122] Soeta Y., Shimokura R., Kim Y. H., Ohsawa T., Ito K. (2013). Measurement of acoustic characteristics of Japanese Buddhist temples in relation to sound source location and direction. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(5), 2699-2710.
- [123] Berardi U. (2014). Simulation of acoustical parameters in rectangular churches. *J. Build. Perf. Simul.*, 7(1), 1-16.
- [124] Berardi U., Martellotta F. (2015). The position of the sound source in churches. Meeting-Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(1), 015001.
- [125] Brezina P. (2015). Measurement of intelligibility and clarity of the speech in Romanesque churches. *J. Cult. Herit.*, 16(3), 386-390.
- [126] Cirillo E., Martellotta F. (2003). Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustical parameters. *Build. Acoust.*, 10, 55-76.
- [127] 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.
- [128] Kosała K. (2011). A single number index to assess selected acoustic parameters in churches with redundant information. *Arch. Acoust.*, 36(3), 545-560.
- [129] Berardi U. (2012). A double synthetic index to evaluate the acoustics of churches. *Arch. Acoust.*, 37(4), 521-528.
- [130] Kosała K. (2012). Singular vectors in acoustic simulation tests of St. Paul the Apostle Church in Bochnia. *Arch. Acoust.*, 37(1), 23-30.

- [131] Kosała K., Engel, Z. (2013). Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach. *Appl. Acoust.*, 74(10), 1144-1152.
- [132] Girón S., Zamarreño T., Álvarez-Morales L., Galindo M. (2015). Índices acústicos globales en grandes espacios de culto. *Proceedings of TecniAcústica 2015*, Valencia, Spain, pp. 1460-1467.
- [133] Carvalho A. (1995). The Sabine equation and coupled spaces in churches. *Proceedings of Inter-Noise 1995*, Newport Beach, California, USA.
- [134] Magrini A., Magnani L. (2005). Models of the influence of coupled spaces in Christian churches. *Build. Acoust.*, 12(2), 115-142.
- [135] 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.
- [136] Martellotta F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126, 1175-1186.
- [137] Martellotta F. (2009). A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L). *J. Acoust. Soc. Am.*, 125, 1281-1284.
- [138] Chu Y., Mak C. M. (2009). Early energy decays in two churches in Hong Kong. *Appl. Acoust.*, 70(4), 579-587.
- [139] Berardi U., Cirillo E., Martellotta F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(4), 1838-1849.
- [140] Carvalho A. P., Morgado A. E., Henrique L. (1997). Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches. *Build. Acoust.*, 4, 1-20.
- [141] Blessler B., Salter L. (2006). Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture. MIT Press, Cambridge, USA.
- [142] Segura J., Giménez A., J. Romero J., Cerdá S. (2011). A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain. *Acta Acust. United Acust.*, 97 (1), 155-170.
- [143] Vorländer M. (2013). Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 1203-1213.
- [144] Martellotta F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 654-663.
- [145] Bradley J. S., Reich R., Norcross S. G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Appl. Acoust.*, 58(2), 99-108.
- [146] 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.
- [147] Queiroz-de-Sant'Ana D., Trombetta-Zannin P. H. (2011). Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Build. Environ.*, 46(2), 511-517.
- [148] Queiroz-de-Sant'Ana D., Trombetta-Zannin P. H. (2014). Acoustic evaluation of a Baroque church through measurements, simulation, and statistical analysis. *Canadian Acoust.*, 42(1), 3-21.
- [149] Sygulska A. (2015). Contemporary two-storey churches-acoustic investigations. *J. Archit. Urb.*, 39(2), 140-148.

- [150] Sumarac-Pavlovic D., Mijic M. (2001). Preferred reverberation time of Serbian Orthodox churches. Proceedings of 17th ICA, Rome, Italy.
- [151] Desarnaulds V. (2002). De l'acoustique des églises en Suisse – Une aproche pluridisciplinaire. Doctoral thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- [152] Carvalho A. P. O., Nascimento B. (2011). Acoustical characterization of the underground chapels of the new Holy Trinity church in the Fatima shrine, Portugal. Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark.
- [153] 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.
- [154] Bonsi D., Boren B., Howard D., Longair M., Moretti L., Orlowski R. (2013). Acoustic and audience response analyses of eleven Venetian churches. *Acoustics in Practice*, 1(1), 39-52.
- [155] Martellotta F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *J. Sound Vib.*, 317(1-2), 378-399.
- [156] Mourjopoulos J., Papadakos C., Kamaris G. (2014). Optimal acoustic reverberation Evaluation of Byzantine chanting in churches. Michigan Publishing, University of Michigan Library, Ann Arbor, USA.
- [157] Bradley D. T., Ryherd E. E., Ronsse L. (2016). Worship spaces acoustics: 3 decades of design. Springer, New York, USA.
- [158] Boren B. B., Longair M. (2014). Acoustic simulation of the church of San Francesco della Vigna. Meeting-Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 18(1), 015003.
- [159] Gagliano A., Nocera F., Cicero A., Gioia M. C. (2015). Proposals and analysis of the effects of acoustic corrections in a modern church. *Build. Acoust.*, 22(3-4), 143-162.
- [160] Segura J., Romero J., Navasquillo J., Giménez A., Cerdá 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.
- [161] Barnobi C. L., Jaramillo A., Young A. (2015). St. Bartholomew's parish hall acoustic analysis. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(4), 2394.
- [162] Berardi U., Iannace G., Ianniello C. (2016). Acoustic intervention in a cultural heritage: The chapel of the Royal Palace in Caserta, Italy. *Buildings*, 6(1), 1, 1-14.
- [163] Rodriguez-Mariño R. (2015). Optimisation of room acoustics in an anthroposophic church (Degree dissertation). Polytechnic University of Valencia, Spain.
- [164] Gagliano A., Nocera F., Cicero A., Gioia M. C., Agrifoglio A. (2015). Analysis and acoustic correction of a Contemporary Italian church. *Energy Procedia*, 78, 1623-1628.
- [165] Martellotta F., Cirillo E., Della Crociata S., Gasparini E., Prezioso D. (2008). Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during the Baroque period: the effect of festive decorations. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 123, 3607.
- [166] 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.
- [167] Martellotta F., Álvarez-Morales L. (2014). Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.

- [168] 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 María de la Murta (in Augmented and virtual reality, pp. 457-464). Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- [169] 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.
- [170] Martellotta F., Cirillo E. (2009). Experimental studies of sound absorption by church pews. *Appl. Acoust.*, 70, 441–449.
- [171] 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.
- [172] Martellotta F., Della Crociata S., D'Alba M. (2011). On site validation of sound absorption measurements of occupied pews. *Appl. Acoust.*, 72, 923-933.
- [173] Montell R., Segura J., Mahiques L. V., Barba A., Giménez A. (2009). Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico. Proceedings of TecniAcústica 2009, Cadiz, Spain.
- [174] Montell R., Giménez A., Segura J., Planells 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.
- [175] Foteinou A., Murphy D. T. (2014). Multi-positional acoustic measurements for auralization of St Margaret's Church, York, UK. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- [176] Howard D., Moretti L. (2009). Sound and space in Renaissance Venice. Yale University Press, London, UK.
- [177] 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.

Partially published in :

Acta Acustica United with Acustica, Vol. 102 (2016) 578 – 591

DOI: 10.3813/AAA.918975

Title: Acoustic characterisation by using different room acoustics software tools: A comparative study

Authors: L. Álvarez-Morales, M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño, R. M. Cibrián



Chapter 2: Acoustic characterisation by using different room acoustics software tools: A comparative study

- 2.1. A brief introduction
 - 2.2. Description of the methodology
 - 2.2.1. Experimental procedure
 - 2.2.2. Processing of RIRs
 - 2.2.3. Analysis procedure
 - 2.3. Results and discussion
 - 2.3.1. Measurement repeatability
 - 2.3.2. Individual analysis: Acoustic characterisation with different measurement software tools
 - 2.3.3. Crossed analysis: Acoustic characterisation with different measurement software tools by processing the same set of RIRs
 - 2.4. Conclusions
-

A room impulse response (RIR) describes the acoustic behaviour of a certain source-receiver combination within a room. In order to characterise an enclosure, several emission and reception positions are used. Current computers, equipped with suitable hardware and software, enable these RIRs to be registered, processed and analysed in an efficient way.

This chapter presents a study of the differences in the results obtained from the use of four commercial software tools widely used in room acoustics. Comparisons are drawn up from the RIRs measured with each tool under the same conditions.

To this end, the main room acoustic parameters defined in the ISO 3382-1 are calculated. For each parameter, the differences between both the spatially averaged value in octave bands and the spectral average at each receiver point are studied, since these values are normally used to characterise the acoustics of a room.

Furthermore, a more detailed study is carried out to evaluate these differences point-by-point in statistical terms, by analysing the dependence on several factors, such as the position of the source, the relative positions of the receiver points, and the frequency band. In order to assess the importance of the differences found, the Just Noticeable Difference (JND) for each parameter is taken as a reference.

This page was left intentionally blank

Partially published in :

Building and Environment, Vol. 72 (2014) pp 102 - 115.

DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.10.015

Title: A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: application to the Cathedral of Malaga

Authors: L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño, S. Girón, and M. Galindo.



Chapter 3:

A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga

- 3.1. A brief introduction
 - 3.2. Description of the methodology
 - 3.2.1. Experimental measurements
 - 3.2.2. Acoustic simulation
 - 3.3. Application to the Cathedral of Malaga
 - 3.3.1. Description of the Catholic Cathedral under study
 - 3.3.2. Results and discussion
 - 3.4. Conclusions
-

Sound propagation in large reverberant religious spaces has remained relatively unexplored within the general context of the acoustics of places of worship. However, complex acoustic physical phenomena can occur in these buildings, where substantial changes in the behaviour of the space can be produced depending on where the sound source is placed.

This chapter describes the complete methodology used for the study of the acoustic environment of the Catholic cathedrals of southern Spain. In order to describe the complete methodology in detail, the Cathedral of Malaga is chosen as a case of study.

The monaural and binaural impulse responses were determined at various receiver points for five positions of the sound source: high altar, pulpit, choir, retrochoir, and organ, which correspond to the positions of the current use of liturgical and cultural activities that take place in the temple. According to the typology of the cathedral, six areas can be established for the location of the congregants and/or the audience. The interdependence of the positions of the source and positions of listeners in the various zones is analysed by processing acoustic parameters related to reverberation, sound strength, clarity, early lateral reflections, and speech intelligibility.

Furthermore, experimental results are compared spectrally with the simulated values obtained from a 3D geometrical-acoustic model created for the space, in which simulation mappings determine the areas of visibility for each sound source position together with the statistical distribution of the values of the acoustic parameters in the areas of influence selected in the cathedral.

This page was left intentionally blank

Partially published in :
 Building and Environment Vol. 103 (2016), pp. 182-192.
 DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.04.011
 Title: Acoustic environment of Andalusian cathedrals
 Authors: L. Álvarez-Morales, S. Girón, M. Galindo and T. Zamarreño



Chapter 4: Acoustic environment of Andalusian cathedrals

- 4.1. Introduction
 - 4.2. Brief description of the cathedrals studied
 - 4.3. Considerations on the common experimental methodology
 - 4.4. Current acoustics of the Andalusian cathedrals. Results and discussion
 - 4.4.1. Cathedrals' reverberation time
 - 4.4.2. Subjective aspects of acoustic parameters in cathedrals
 - 4.4.3. Comments on acoustic data
 - 4.4.4. Acoustic energy relations in Andalusian cathedrals
 - 4.4.5. Overall acoustic indices in the Andalusian Cathedrals
 - 4.5. Conclusions
-

The growing interest over recent decades in acoustic behaviour of heritage buildings has been triggered by the focus on providing new information about their cultural character. Cathedrals form an essential part of Europe's cultural, architectural and artistic heritage, and the preservation of their sound is key for the safeguarding of their singular ambiences. This chapter describes the acoustic aspects of the main cathedrals of Andalusia, which constitute vast places of worship currently viewed as multifunctional enclosures capable of housing a large audience.

Following the experimental methodology described in *Chapter 3*, which is based on measuring the monaural and binaural impulse responses, acoustic parameters are determined that are associated with the various uses and areas of each cathedral. The monumental size of these buildings and the characteristics of the materials used in their construction render cathedrals highly reverberant spaces.

Results confirm that the distribution of the early reflected energy, and the acoustic characteristics of reverberation, spaciousness, strength, and clarity for favourable transmission of spoken or sung messages and music, exhibit a remarkable dependence on sound-source location and its areas of influence.

This page was left intentionally blank

Partially published in :

Applied Acoustics, Vol. 91 (2015) pp 47 - 58.

DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.12.004

Title: A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches

Authors: L. Álvarez-Morales and F. Martellotta.



Chapter 5:

A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches

- 5.1. A brief introduction
- 5.2. Description of the methodology applied
 - 5.2.1. Surveyed churches
 - 5.2.2. On site measurements
 - 5.2.3. Simulation of unoccupied conditions
 - 5.2.4. Simulation of occupied conditions
- 5.3. Results
 - 5.3.1. Effect of the occupancy
 - 5.3.2. The effect of source position
- 5.4. Conclusions

Historical churches represent an important cultural heritage that nowadays is often used in different ways compared to the original design. In fact, both the "new style" of the celebration (introduced after the Second Vatican Council) and the frequent use as multifunctional spaces ask for different acoustic conditions, also changing the nature and the position of the sound sources compared with the original usage.

Most of the available measurement campaigns were carried out using conventional sound positions and unoccupied conditions. However, due to the widespread use of scarcely sound absorbing surfaces, the presence of congregation may change dramatically the acoustical conditions inside the churches, and further variations can be introduced by changes in source placement.

In order to analyse such effects, acoustic simulations were performed using a commercial software tool, starting from calibrated models of six different churches. The presence of the congregation determined a significant improvement in monaural acoustical parameters, especially in reverberation which was strongly reduced in all cases. Conversely, spatial parameters showed negligible variations. As variations in reverberation time were predicted with good accuracy by Sabine's formula and variations in centre time were in agreement with diffuse field theory, a simplified method to estimate occupied parameters from unoccupied values was proposed.

Finally, the original acoustic conditions were simulated by placing a source with human talker directivity in front of the altar facing both the congregation and the main altar, and, where available, on the pulpit facing the congregation. When the priest turned his back to the congregation speech intelligibility dropped in all the churches, particularly where the reflecting surfaces of the apse were at greater distance. The pulpit position provided better results, however in most of the cases they were simply due to the shorter source-receiver distance.

This page was left intentionally blank

Chapter 6: Summary and conclusions

- 6.1. Summary and conclusions
 - 6.2. Direction of further research
-

The present chapter reiterates the research questions explored in this doctoral thesis and summarises the findings derived from the study of the acoustics of large places of worship. It also presents the main conclusions drawn in connection to the research work previously discussed in the body of the thesis.

Moreover, the contributions of the research work presented here are identified, and suggestions for further research into the acoustics of large places of worship on the basis on the results described are also introduced.

This page was left intentionally blank

6.1. Summary and conclusions

The research on acoustics of heritage buildings is based on the premise that sound is an essential part of our intangible cultural heritage, and therefore it must be preserved. In this regards, this doctoral thesis, which is framed within the national research project entitled "*Acoustics of cathedrals: A scientific contribution for the recovery of Cultural Heritage*" (BIA2010-20523), deals with the acoustic characterisation of large places of worship, and focuses on the analysis of the acoustic environment of six Andalusian cathedrals: one of the groups of heritage buildings most representative of the culture of our region.

To accomplish that goal, this thesis uses a multidisciplinary approach to carry out an in-depth analysis on the acoustic behaviour of cathedrals, based on the combination of both advanced measurement methods and acoustic simulation techniques. Such a methodological approach is built on the wide experience of the research group TEP-130 of the acoustic characterisation and acoustical refurbishment of heritage buildings. Nevertheless, the methodological process applied has been slightly refined in order to achieve a greater level of accuracy in the acoustic characterisation of cathedrals, by taking into consideration the peculiarities of this group of buildings.

The first task carried out involved a detailed study to ensure the high quality of the experimental method applied for the acoustic characterisation, by focusing on the measurement chain, specifically on those software tools used to register and process the RIRs. In this regard, a blind comparative study on the acoustic parameters obtained by using four widely utilised commercial software tools (ARTA, Dirac, EASERA, and WinMLS) was performed, both in general and in statistical terms.

The particular importance of this study lies in the fact that the influence of the software tool on the parameter values is assessed in a isolated way, leaving aside the implication of any other element of the measurement chain. Furthermore, two of these software tools, EASERA and ARTA, had never before been part of any other international round-robin comparison, and several parameters had also been included for the first time in this type of study. Related to this issue the following conclusions were reached:

Concerning reproducibility and repeatability:

- The comparative study carried out provides an insight into the reproducibility and repeatability of room acoustic characterisation results, which is highly useful to ensure that the software tools tested have no influence on the acoustic characterisation of a room.
- In this study, the average relative error committed on giving a parameter value stands at approximately 2% and has no dependence on the software tool used. The repeatability analysis also reveals negligible variations in perceptual terms with the four software tools (variations of the acoustic parameter values measured in the repetitions remain below 0.2 JND).

Concerning the influence on the results of the software tool employed in the acoustic characterisation:

- The individual analysis determines that the four software tools measure and process the RIRs equivalently, since the differences on parameter values employed to acoustically characterise a room by means of application of any of these tools remains below 1 JND in more than 91% of the cases, except for the G and L_J parameters. When the spatially averaged value of acoustic parameters is used for the characterisation of a room, then the results obtained by using any of the four systems are equivalent except for the aforementioned parameters G and L_J , and for EDT , C_{50} , C_{80} , and D_{50} at low-frequency bands. Conversely, if spectrally averaged values are used for the characterisation, there is no statistically significant difference for any parameter (maximal variances are lower than 1 JND).
- The crossed analysis reveals a very good strength of concordance for all parameters when processing the same set of RIRs with any of the software tools included in the study. Point-by-point differences between the results obtained with each tool are slightly reduced with respect to the individual analysis (differences below 1 JND in more than 94.3% of the cases). Moreover, negligible differences are encountered when characterising a room either with spatially or spectrally averaged parameter values.
- To be able to ensure the interchangeability between systems, the *.wav* format is convenient only when dealing with omnidirectional RIRs, whereas the *.tim* format is recommendable when binaural or relative parameters (which involve two correlated RIRs) are required.

Once this fundamental step was achieved, this research was able to go forward, and the complete methodology for studying the acoustic environment of cathedrals was refined through its application in the characterisation of the cathedral of Malaga, presented as a case study. Such methodology improved the acoustic characterisation of the space through appropriate adaptations performed both in the measurement procedure and in the virtual modelling process. In the work on this matter, the following conclusions can be drawn:

Concerning measurement procedure:

- Measurement and processing procedures of impulse responses have been optimized: the duration of the measurement process has been reduced by increasing the number of positions simultaneously characterised thanks to the incorporation of new microphones and new multichannel data-acquisition equipment (this implies the necessity of carrying out detailed documentation work of each measurement session); and both the manageability and data processing have been improved by using computational tools which entail minimum manual work and a more automated analysis process.
- Having into consideration the monumental size of cathedrals, their architectural complexity, and the interior distribution of these spaces, the acoustic characterisation by zones has proved to be an effective strategy for the analysis of their acoustic

environment. Each zone must be delimited according to the area of influence of each source position located where the natural source would be placed, considering both liturgical and cultural uses of the temples. To this end, a minimum of 6 receiver points located throughout each zone are now known to be required in order to be able to draw meaningful conclusions.

- The detailed analysis of the values of the acoustic parameters measured in the cathedral of Malaga has revealed that there are significant differences in the acoustic conditions depending on the zones and/or the source positions considered. Indeed, the choir and the retrochoir can be considered as singular spaces inside the cathedral, where the reduction of the perceived reverberation time, together with the increment of lateral reflections, favours the clarity of both music and speech, as well as the feeling of spaciousness and envelopment.

On the virtual modelling process:

- The application of virtual acoustic techniques constitutes another important objective of the methodology of analysis of the acoustic environment of cathedrals, since they are considered powerful tools to gain further understanding of their acoustic behaviour, and also enable the prediction, with reasonable fidelity, of other past, present, and future hypotheses. This thesis reaffirms that high-quality acoustic simulations yielding reliable results can be achieved for these huge religious sites, provided that appropriate adaptations are implemented in the standard modelling and calibration processes.
- In pursuing the objective above, the virtual model created for the acoustic simulation of the cathedral of Malaga has been used to discuss how the proposed approach can be conveniently used with reference to the modelling of Andalusian cathedrals:
 - Regarding the modelling technique, both the simulation results and the computational costs obtained with different reduction rates of the virtual model were compared, in order to achieve a sufficiently accurate representation of reality with the least possible number of surfaces. Due to the monumental size and the architectural style of the Andalusian cathedrals, a reduction in the number of planes lies in a considerable simplification of the ceiling and columns, by using geometrically simpler forms, but by compensating the total area that they actually cover. Additionally, extreme simplification of lateral chapels is recommended to considerably reduce the number of polygons in the virtual model with clearly fewer consequences on results than the reduction of the zones neighbouring the audience area. Moreover, locations of the receivers in the geometrical model have proved to exert the highest influence on results.
 - The tuning process, applied to refine the simulation model of cathedrals, is based on an iterative process that includes three differentiated steps: the point-by-point comparison of measured and simulated parameter values; the inspection of omnidirectional RIRs and the specular echogram of the first 100 ms; and the analysis from the 3D information from the B-format room impulse responses. Calibration, not only through parameter values, but also through the inspection of the RIRs (especially through the 3D sound field information) has proven to be

essential for detecting certain imperfections/inaccuracies in the model, and therefore, is extremely useful for improving the quality of the acoustic simulation.

- Since has now been revealed that it is practically impossible to achieve a perfect agreement between measured and simulated RIRs due to the simplification of the actual architecture implied in the process, attention has been focused on keeping the divergences to a reasonable minimum. This research shows that, in the case of cathedrals, by taking into consideration the complexity of the space and the uncertainties associated with both measurement and simulation software tools, whether the differences on measured and simulated parameter values remain below 3 JNDs, then the simulation can be considered satisfactory.

This methodology has been applied to several large places of worship in order to preserve their acoustic environment for posterity and to analyse their present acoustic behaviour through the RIRs measured in situ. Not only does such research increase the intangible heritage of each temple individually, but it also provides new valuable knowledge on the acoustics of one of the most important groups of heritage buildings of Europe, thereby highlighting the singularities of Andalusian cathedrals.

The sample chosen for this research work involves the most representative Andalusian cathedrals from an architectural, cultural, and touristic point of view: the cathedrals of Cadiz, Cordoba, Granada, Jaen, Malaga, and Seville.

The choir constitutes the key element in the spatial distribution of the interior of the Andalusian cathedrals. Located in the middle of the central nave, following the so-called "Spanish style" by the renowned architect Pedro Navascués, the choir fractures the enormous temple, fostering a peculiar use of the space. Through this observation, and considering the various liturgical and cultural uses of the studied temples, which are clearly conditioned by their common architectural features, five common source positions were established and six common zones of use/audience areas were delimited within each temple, so that data would be comparable and meaningful conclusions could therefore be drawn that could be applicable to similar buildings.

Listed below are the main findings arising from the analysis of the experimental measures carried out in the Andalusian cathedrals:

Concerning reverberation conditions:

- The six cathedrals characterised are highly reverberant spaces (T_{30m} values, measured with the sound source located at the high altar, varies from 4.73 s in the cathedral of Cordoba to 8.89 s in the cathedral of Cadiz), presumably due to their large volume and the predominance of the stone and other reflective finishing materials in their interior.
- Previous research on reverberation conditions of large worship places (those with volumes greater than 25,000 m³) have led to a broad range of T_{30m} values, which varies from about 2 to 12 s. In view of such a variation, it remains difficult to define a typical value of reverberation time in large worship places. Furthermore, these high values of reverberation time can be considered in excess of those typically recommended for music and those for speech transmission. However, since reverberation perception is

strongly influenced by psychoacoustic factors, especially when dealing with this kind of building, the prevision of preferable/recommended values becomes difficult.

Concerning speech and music conditions:

- A preliminary rating scale has been established for the room acoustic parameters that are commonly used to assess the perceived clarity of sound: T_S , C_{50} , D_{50} and C_{80} . This scale is based on the study of the correlation of their measured values with the STI measured values, whose rating scale is widely contrasted and is commonly used in room acoustics. Although a corroboration with psychoacoustic studies is required, the rating scales are highly useful as a preliminary assessment of the perceived clarity of sound in Andalusian cathedrals.
- In general, *poor* speech intelligibility is perceived in the main congregation/audience area ($STI < 0.45$ and $D_{50m} < 0.30$) when the sound source is located at the high altar or in the choir, clearly due to the high level of perceived reverberation (EDT_m from 6.65 s to 8.62 s), except in the cathedrals of Cordoba and Seville, where these values are nearly in the *acceptable* range. Furthermore, although music conditions in cathedrals are appropriate for organ music, which was specifically composed to be played in these highly reverberant spaces, the low C_{80m} measured values (below -5 dB for the cathedrals of Cadiz, Granada, Jaen and Malaga) denote *poor* musical clarity for choral, chamber, and classical symphonic music.
- The values of the parameters related with the perceived clarity of sound and speech intelligibility slightly improve when the sound source is located on the pulpit, possibly due to the effect of the canopy and the reduction of the source-receiver distances.

Concerning the subjective level of sound and spatial impression:

- A strong correlation has been found between the measured values of G_m , which quantify the subjective level of sound, and L_{jm} , which is directly related to listener envelopment (LEV). Both parameters show values lower than expected in all the cathedrals studied, especially in the cathedral of Seville. This expectation was due to the previous deduction that the higher the reverberation time, the greater both the subjective level of sound and the sensation of LEV.
- Another attribute considered as a major aspect of the spatial impression is the apparent source width (ASW), which can be measured in terms of J_{LF} and/or 1-IACC_E. In contrast to the results performed in concert halls, these two parameters are not significantly correlated in the cathedrals, despite following the same trend. Therefore, it would be recommendable to use 1-IACC_E values to assess the spatial impression, since it is proven to be directly related with the ASW. Regarding results, extremely low values of J_{LFm} are found with the source located at the high altar, especially at the lower G_m values, which is possibly due to the fact that lateral reflections tend to be scattered and weakened by the lateral chapels. Conversely, IACC_{Em} values are of the order of those obtained in the best subjectively valued concert halls.
- Leaving aside the retrochoir, the location of the source position has no relevant influence on loudness or spatial impression and, although the ASW is good in the

various audience zones, the reduced number of lateral early reflections cause a low sensation of LEV.

Concerning the subdivision of the space: independent spaces from an acoustical point of view:

This investigation demonstrates that, in those cathedrals that maintain the choir in the middle of the central nave (Spanish style):

- The choir can be considered as a reduced-size "volume" inside the main temple of the cathedrals studied, which is commonly used independently for daily celebrations with reduced attendance as "a church within a church". Although the choir is not really an independent space, since it is partially open to the rest of the temple, sound-absorbing materials are present in greater proportions and are distributed more homogeneously than in the rest of the temple. This fact, together to a reduction in the source-receiver distances, yields a considerably reduction in perceived reverberance. All the above, together with the fact that there is a noticeable increment of the early lateral reflections, greatly benefit the clarity of both music and speech (reaching values rated as *acceptable/good*), and favour the feeling of spaciousness and envelopment inside the choir.
- The retrochoir is also configured as a "semi-independent" space, where acoustic conditions are more favourable than in the rest of the temple. This is due mainly to the fact that the retrochoir serves as a separate space, and therefore, source-receiver distances involved are smaller. Additionally, this space is subjected to less influence from the naves and lateral chapels of the temple and the number of early reflections is increased. For these reasons, the early decay time is much shorter in this zone, which brings greater values of the perceived clarity of sound, and also improves the sound strength levels and the spatial impression.

Concerning acoustic energy relations:

Another important issue addressed in this research work is the evaluation of the applicability of the analytical μ model for the prediction of the behaviour of energy parameters as a function of source-receiver distances in the six Andalusian cathedrals. The following conclusions emerged from the discussion of such on analysis:

- The estimation of a unique μ coefficient, calculated from all the source-receiver combinations characterised in each temple, leads to an imprecise prediction of the energy parameter values (D_{50} , T_s , and G).
- Results obtained independently for the source in the high altar (SA), on the pulpit (SP) and in the choir (SC) indicate that the μ coefficient greatly varies depending on both the cathedral under study, and on the source position analysed, which suggests that the pattern of first reflections is strongly influenced by the geometric and architectural characteristics near the sound-source position. For that reason, neither can a unique value of the μ coefficient be associated to each source position for all the Andalusian cathedrals, nor can it be associated to each cathedral for any source position. Nevertheless, predicted values of the energy parameters (D_{50} , T_s and G) achieve a high level of alignment with those values measured in-situ when the μ

coefficients are separately calculated for each cathedral and source position, and certain similarities between temples are encountered:

- According to the results obtained with SA and SC source positions, with the μ coefficient varying from 0.11 to 0.55 and from 0.19 to 0.49, respectively, the more open the space is around the sound source, the higher the values of the μ coefficient become, which correspond to those cathedrals which have the main altar open to the deambulatory and to those where SC is located at the rear part of the choir, respectively.
- In all the cathedrals where SP is characterised, a μ coefficient of approximately 0.08 is estimated. This value is much lower than those obtained for the other two source positions analysed, which can be related with the fact that SP in Andalusian cathedrals is commonly located at one side of the high altar instead in the symmetry axis of the building. Furthermore, these results demonstrate that the patterns of early reflections are, as stated before, highly influenced by the surfaces near the source. The low values of the μ coefficient can also be due to the change of angles of incidence of sound on receivers (more acute) when the source is on the pulpit.

Concerning synthetic indices:

And last but not least, an adjusted methodology has been proposed for the calculation of two global indices in an attempt to summarise the acoustic quality of large places of worship: one for music and another for speech and singing. Such a methodology, based on previous work published by Berardi, consists of a comparison of the averaged values of five orthogonal acoustic parameters, which evaluate five perceptual acoustic characteristics of the spaces studied: reverberation, warmth, spaciousness, strength, and clarity, represented by EDT, BR, J_{LF} and IACC_E, G , and by C_{80} for music and C_{50} for speech and singing, respectively.

- Regarding adjustments to Berardi's calculation procedure:
 - The centre time, T_S , has been suppressed from the method of the global indices calculation since the correlation study on the averaged measured values of the aforementioned acoustic parameters reveals a strong dependence between EDT_m and T_{Sm} ($r^2=0.80$), and also, although weaker, a significant dependence between T_{Sm} and the clarity parameters. Consequently, the corresponding weight previously assigned for the calculation of the global Berardi indices, has been redistributed between the clarity parameters and the BR, which also assesses the sound quality..
 - In the calculation of the global index for speech and singing, the C_{50} optimal value has been replaced by 1.5 dB, thereby ending the uncertainties in the wording proposed by Berardi. Such a value has been established on the basis of the findings of the subjective tests performed by Martellotta, and the results of the correlation study carried out in this thesis, in which the C_{80m} and C_{50m} measured values present an almost perfect correlation ($r^2 = 0.98$).

- Regarding results on global indices:
 - In the six cathedrals studied, the speech and singing index remains at approximately 0.6 and shows no significant variations depending on the sound-source position. This value presumably denotes a *bad* acoustic environment for word transmission, since, although further research is needed to establish a reliable rating scale of global indices, by definition, a global index value of 1 denotes excellent acoustical conditions, and a global index value of 0 determines *poor* acoustical conditions.
 - The global indices for music quality are of the same order as those obtained for speech and singing quality in extremely high reverberant spaces, such as the cathedrals of Cadiz, Granada, Jaen and Malaga, whose music index is only greater when the source is located in the retrochoir. However, in the cathedrals of Cordoba and Seville, the music index calculated for all source positions moves to the 0.8-1.0 interval, which indicates better acoustic conditions for music.
 - Similar conclusions are reached with overall synthetic indices both for music, and for speech and singing, when all source-receiver combinations measured in each cathedral are taken into account.

In view of the results, the methodology applied to acoustically characterise Andalusian cathedrals can be extended to other large places of worship. Thus, in order to further analyse the influence of the source position and orientation on the acoustic conditions of the audience area, and to reach an understanding on the effect of occupancy in large places of worship, a study based on acoustic simulation techniques has been carried out.

Six historical churches were included in the study, dated from different periods (from the 12th to the 17th century) and varied in style, dimensions, and typology, so that the influence of these variables on the acoustics could also be considered. Their acoustic models were created and calibrated following the procedure described above, thereby taking on-site measurements as a reference. These models were then carefully modified to simulate the test conditions. It must be take into account that, in order to draw conclusions, relative variations on acoustic parameters were mostly analysed rather than absolute values, so that meaningful results could be provided despite the inherent limitations that exist with regard to the modelling procedure and the simulation techniques employed.

Not only has this research contributed towards the knowledge of acoustics concerning traditional Catholic liturgical practices, but it has also led to valuable information on the influence of the positioning of the preacher and the directivity of a real speaker on listening conditions in large places of worship: two aspects that have long been neglected by many research studies on church acoustics.

On the effect of occupancy on church acoustics:

- Simulation results show that the presence of a congregation exerts a significant influence on reverberance conditions, and can cause reductions of up to 30% (6 JNDs) from the original T_{30} values, mostly in the medium-high frequency range, particularly

in churches where the occupied surface in mass-attendance events is proportionally large compared to total surface area. Notwithstanding these variations, the absolute values still remain large compared with the required values, since, in general, they remain suitable for only organ music and slow Gregorian chants.

- The effect of the occupancy on both early and late reflections was further investigated by analysing its influence on the energy-based parameters. Results show that the presence of the congregation strongly affects the perceived reverberation (differences in terms of JNDs between occupied and unoccupied EDT values, varying from 2.9 to 5.8 JNDs), but surprisingly, in accordance with the slight variations obtained for T_s , C_{80} , G , and STI values (smaller than 3 JNDs except for isolated cases), it could be stated that occupancy only moderately improves the perceived quality of sound, which, despite everything, remains below the *acceptable* range for a good transmission of music and speech.
- Additionally, spatial parameters J_{LF} and $IACC_E$, which depend on only early lateral reflections, remain practically unaffected by occupancy, since they present variations generally well below 1 JND, meaning that a listener would probably be unable to notice any significant variation in spatial impression moving from unoccupied to occupied conditions.
- These results confirm that the audience barely affects the distribution of the early lateral reflections, at least from the point of view of acoustic perception, regardless of style, dimensions, and typology of the worship space studied.
- Moreover, the influence of reverberation on energy-based parameters is demonstrated by showing that T_s variations from unoccupied to occupied conditions can be predicted (with reasonable accuracy) with T_{30} variations by means of diffuse field theory formula ($\Delta T_{Sm} = \Delta T_{30m}/13.8$ [ms]). This procedure proves very effective in churches with simple and proportionate volumes, while providing acceptable results in the other churches of a more complex geometry.

Concerning the effect of source position and orientation:

- In order to assess the acoustics of the surveyed churches from an historical perspective a source with human talker directivity was considered and located in the traditional (preceding the Second Vatican Council) source positions: in front of the high altar, facing both the congregation and the altar, and on the pulpit.
- Simulations confirmed that the most unfavourable intelligibility conditions (STI rated as *poor* or *bad* in the majority of the audience area) were experienced when the priest, located at the high altar, turned his back to the congregation. Such configuration corresponds to the position of the priest during most of the ceremony (using only the Latin language) when Mass was held in a traditional style (Tridentine Mass). Results also reveal that the speech intelligibility, despite having been dropped in all the churches surveyed, is in those churches that have a free-standing altar and, consequently, fewer reflecting surfaces close to the source, where greater variations are encountered.

- Acoustic simulations performed with the source located on the pulpit reveal a significant improvement in speech intelligibility: STI values rated as *fair*, varying between 0.5 and 0.6, are achieved in most of the churches. The detailed analyses of the specular echograms of the first 100 ms and the 3D spatial maps reveal that such an improvement is motivated by the presence of reflecting surfaces next to the pulpit, which are capable of providing strong early reflections that greatly affect the results, together with a considerable reduction of the source-receiver distances due to the relative position of the pulpit with respect to the location of the congregation. Conversely, the canopy (where available) is shown to have a limited acoustic effectiveness on a narrow area below the pulpit. Note that these results are in agreement with those measured in Andalusian cathedrals.

This doctoral thesis highlights the importance of cathedral acoustics as an essential element of the intangible heritage of these buildings. The research carried out has offered substantial contributions to the intangible cultural heritage of the six Andalusian cathedrals characterised through the registration of numerous RIRs which describe the acoustic experience within each cathedral.

The archived RIRs, in combination with any dry recordings of the speech/music pieces that form part of any relevant liturgical or cultural event, enable the creation of auralizations of sounds that form part of the culture and history of these buildings, thereby providing an alternative way to experience the peculiar aural environment of cathedrals.

Furthermore, the characterisation through the RIRs leads to the preservation of the acoustic environment of cathedrals, and hence the acoustic aspects can be considered during future restoration work or any intervention in the same way as any other visual or architectural property of the space.

Additionally, the methodology proposed for the acoustic simulation of the temples offers the possibility of assess the acoustic impact of any hypothesis involving changes in the current state of the temple. One of the most important applications for which the simulations are being used include the recovery of the RIRs associated to various historical periods for the recreation of their past acoustics, which would extend the historical knowledge on the cathedrals. This research line is currently being developed by another member of the research group TEP-130, as part of her doctoral thesis.

It is worth stressing that the detailed acoustic analysis developed in this thesis substantially contributes towards the knowledge of the acoustics of large places of worship. The research findings are of great interest to the scientific community, especially to other research groups engaged in church acoustics, and may also be useful if a new part of ISO 3382 that specifies a measurement method to analyse the perceived acoustic conditions of cathedrals and large places of worship, including typical values and subjective preferences in these buildings, was drafted.

6.2. Direction of further research

Not only has the study offered a significant contribution to the intangible cultural heritage associated to Andalusian cathedrals, but it has also added to the research field of church acoustics. Nevertheless, as a direct consequence of the applied methodology, together with the fact that the number of cathedrals included, although representative and diverse, remains small, the study contains certain limitations that imply further investigation. The exploration into the following proposals as future research strategies would facilitate the extension of the results of this research:

- Further analysis in collaboration with the developers of the commercial measurement software tools is required in order to better assess the uncertainty of objective measurements of the room impulse responses, especially in the area of processing algorithms. Thus, a wider survey involving more software tools and different types of enclosures should provide data to ensure results of a more reliable and robust nature.
- As stated above, when dealing with this kind of building, the provision of recommended values becomes difficult, since reverberation perception is strongly influenced by psychoacoustic factors, such as the feeling of involvement, and hence, it is not easy to strike a balance between objective values and subjective expectations. Therefore, major cooperation of various research groups becomes necessary for the identification of a subjective scale for acoustic assessment of large worship places (volumes greater than 25,000 m³), which encompasses several types of buildings, cultures, and religions.
- It would be of great value to expand the sample of characterised cathedrals, by including other Spanish cathedrals of the same typology, so that their acoustic environment would be preserved; a comprehensive statistical study could also be performed to reinforce the conclusions reached with this thesis.

Several of these lines of research are currently being addressed by the research group TEP-130 as part of the new national research project entitled "*Acoustics and virtual reality in Spanish cathedrals: strategic innovation applied to intangible heritage towards a European cultural identity*", which will continue to explore the acoustic heritage of cathedrals by using innovative approaches and virtual reality techniques to further analyse both physical aspects of the acoustic behaviour of these buildings (acoustic coupling between spaces) and perception aspects (perceived quality and discrimination thresholds of acoustic parameters).

This page was left intentionally blank

Bibliography

- Abdelazeed M. K., Hammad R. N., Mustafa A. A. (1991). Acoustics of King Abdullah mosque. *J. Acoust. Soc. Am.*, 90(3), 1441-1445.
- Adel A. A. (2003). Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(3), 1505-1517.
- Ahnert W., Feistel S., Behrens T. (2013). Speech intelligibility prediction in very large sacral venues. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 015117.
- Alberdi E., Galindo M., León A. L. (2015). Acústica virtual de la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla. Proceedings of TecniAcústica 2015, Valencia, Spain, pp. 1507-1514.
- Alberdi E., Galindo M., León A. L., Bueno A. M. (2014). El ambiente sonoro en la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla. Proceedings of TecniAcústica 2014, Murcia, Spain, pp. 1300-1307.
- Alonso A., Martellotta F. (2015). Room acoustic modelling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *J. Build. Perf. Simul.*, in press.
- 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. (2014). Sound space reconstruction in the cathedral of Seville for major feasts around the main chancel. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- 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. *J. Build. Perf. Simul.*, 7(5), 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.
- Álvarez A., Zamarreño T., Galindo M., Girón S. (2014). Acústica virtual del teatro romano de Itálica. Proceedings of TecniAcústica 2014, Murcia, Spain, pp. 1229-1236.
- Álvarez A., Zamarreño T., Galindo M., Girón S., Bustamante P. (2015). Acústica virtual del teatro romano de Regina Turdulorum. Proceedings of TecniAcústica 2015, Valencia, Spain, pp. 1515-1522.
- 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, Spain, pp. 106-113.
- 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, Valencia, Spain, pp. 705-712.
- Álvarez-Morales L., Alonso A., Zamarreño T., Girón S., Galindo M. (2011). Virtual acoustics of the Cathedral of Malaga (Spain). Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, pp. 1475-1480.

- Álvarez-Morales L., Franco A., Alonso A., Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2013). Modelo acústico virtual de la catedral renacentista de Jaén. Proceedings of TecniAcústica. 2013, Valladolid, Spain, pp. 1456-1464.
- Álvarez-Morales L., Galindo M., Girón S., Zamarreño T., Cibrián R. M. (2016). Acoustic characterisation by using different room acoustics software tools: A comparative study. *Acta Acust. United Acust.*, 102(3), 578-591.
- Álvarez-Morales L., Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2016.) Acoustic Environment of Andalusian Cathedrals. *Build. Environ.*, 103, 182-192.
- Álvarez-Morales L., Martellotta F. (2014). Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- Álvarez-Morales L., Martellotta F. (2015). A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Appl. Acoust.*, 91, 47-58.
- 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, *Build. Environ.*, 72, 102-115.
- Anderson J. S., Bratos-Anderson M. (2000). Acoustic coupling effects in St. Paul's Cathedral, London. *J. Sound Vib.*, 236, 209-225.
- Anderson J., Bratos-Anderson J. S. (1999). St. Paul's Cathedral, London, as a concert hall. Proceedings of 6th ICSV, Copenhagen, Denmark.
- Ando Y. (1977). Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo. *J. Acoust. Soc. Am.*, 62, 1436-1441.
- Ando Y. (1985). Concert hall acoustics. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Arau-Purchades H. (1988). ABC de la acústica arquitectónica. CEAC, Barcelona, Spain.
- Barnobi C. L., Jaramillo A., Young A. (2015). St. Bartholomew's parish hall acoustic analysis. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(4), 2394.
- Barron M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls—the need for lateral reflections. *J. Sound Vib.*, 15(4), 475-494.
- Barron M. (1984). Impulse testing techniques for auditoria. *Appl. Acoust.*, 17(3), 165-181.
- Barron M. (1988). Subjective study of British symphony concert halls. *Acta Acust. United Acust.*, 66(1), 1-14.
- Barron M. (1993). Auditorium acoustics and architectural design. E&FN Spon, London, UK.
- Barron M., Lee L.-J. (1988). Energy relations in concert auditoriums I. *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 618-628.
- Beranek L. L. (1979). Music, acoustics and architecture. RE Krieger Publishing Company, New York, USA.
- Beranek L. L. (1989). Balanced noise-criterion (NCB) curves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, 650-664.
- Beranek L. L. (2004). Concert halls and opera houses –Music acoustics and architecture. Second edition, Springer Verlag, New York, USA.

- Beranek L. L. (2008). Concert Hall Acoustics-2008. *J. Audio Eng. Soc.*, 56, 532-544.
- Beranek L. L. (2011). The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(5), 3020-3026.
- Berardi U, Cirillo E, Martellotta F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(4), 1838-1849.
- Berardi U. (2012). A double synthetic index to evaluate the acoustics of churches. *Arch. Acoust.*, 37(4), 521-528.
- Berardi U. (2014). Simulation of acoustical parameters in rectangular churches. *J. Build. Perf. Simul.*, 7(1), 1-16.
- Berardi U., Iannace G., Ianniello C. (2016). Acoustic intervention in a cultural heritage: The chapel of the Royal Palace in Caserta, Italy. *Buildings*, 6(1), 1, 1-14.
- Berardi U., Martellotta F. (2015). The position of the sound source in churches. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 21(1). 015001.
- Blauert J., Xiang N. (2009). Acoustics for engineers. Second edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Blesser B., Salter L. (2006). Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture. MIT Press, Cambridge, USA.
- Bonsi D., Boren B., Howard D., Longair M., Moretti L., Orlowski R. (2013). Acoustic and audience response analyses of eleven Venetian churches. *Acoustics in Practice*, 1(1), 39-52.
- Boren B. B., Longair M. (2014). Acoustic simulation of the church of San Francesco della Vigna. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 18(1), 015003.
- Boren B., Longair M., Orlowski, R. (2013). Acoustic simulation of renaissance Venetian churches. *Acoustics in Practice*, 1(2), 17-28.
- Bork I. (2000). A comparison of room simulation software-The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acust. United Acust.*, 86(6), 943-956.
- Bradley D. T., Ryherd E. E., Ronsse L. (2016). Worship spaces acoustics: 3 Decades of design. Springer, New York, USA.
- Bradley D. T., Wang L. M. (2007). Comparison of measured and computer-modelled objective parameters for an existing coupled volume concert hall. *Build. Acoust.*, 14(2), 79-90.
- Bradley J. S. (1992). Predicting the absorption of pew cushions. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, 2470.
- Bradley J. S. (1994). Comparison of concert hall measurements of spatial impression. *J. Acoust. Soc. Am.*, 96(6), 3525-3535.
- Bradley J. S. (2005). Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. *Acoust. Sci. Tech.*, 26(2), 170-178.
- Bradley J. S., Reich R., Norcross S. G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Appl. Acoust.*, 58(2), 99-108.

- Bradley J. S., Soulodre G. A. (1995). Objective measures of listener envelopment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 2590-2597.
- Bradley S. (1996). An international comparison of room acoustics measurement systems. Internal Report, IRC-IR-714 National Research Council, Canada.
- Brezina P. (2015). Measurement of intelligibility and clarity of the speech in Romanesque churches. *J. Cult. Herit.*, 16(3), 386-390.
- Brüel P. V. (1951). Sound insulation and room acoustics. First edition, Chapman and Hall, London, UK.
- Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2011). Simulación acústica de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 122-129.
- Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2012). Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Arch. Acoust.*, 37, 435-446.
- Bueno A. M., León A. L., Galindo M. (2013). Simulación de las condiciones acústicas de tres iglesias de Fisac. Proceedings of TecniAcústica 2013, Valladolid, Spain, pp. 1465-1472.
- Bueno A. M. (2014). El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- Bustamante P. (2016). Evaluación acústica objetiva y subjetiva en salas y teatros de Andalucía. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- Bustamante P., Girón S., Zamarreño T. (2014). Simulated sound-fields in a multi-configurable auditorium. *Arch. Acoust.*, 39(3), 365-383.
- Bustamante P., Zamarreño T., Girón S. (2013). Acústica virtual del escenario multi-configurable del teatro de la Maestranza. Proceedings of TecniAcústica 2013, Valladolid, Spain, pp. 1473-1481.
- Bustamante P., Zamarreño T., Girón S., Galindo M., Sendra J. J. (2007). General acoustic characterization of the Maestranza theatre in Seville. Proceedings of ISRA 2007, Seville, Spain.
- Cabrera D., Lee D., Leembruggen G., Jimenez D. (2014). Increasing robustness in the calculation of the speech transmission index from impulse responses. *Build. Acoust.*, 21, 181-198.
- Cabrera D., Xun J., Guski M. (2016). Calculating reverberation time from impulse responses: a comparison of software implementations. *Acoust. Aust.*, in press.
- Camacho-Martínez R. (1981). Málaga Barroca. Arquitectura religiosa de los siglos XVII y XVIII. Colegio de Arquitectos y Diputación Provincial, Universidad de Málaga, Spain.
- Camacho-Martínez R. (1999). De mezquita a templo cristiano: etapas en la transformación y construcción de la Catedral de Málaga. En Arcos-von-Haartman E.: Retrato de la Gloria. Restauración del altar mayor de la Catedral de Málaga. Winterthur, Barcelona, Spain.
- Camacho-Martínez R. (2000). La Catedral de Málaga en tiempos de Felipe II. Obras del coro (1589-1599). En Felipe II y las artes. Actas del Congreso Internacional Madrid, Spain, pp. 267-282.

- Camacho-Martínez R. (2010). Arquitectos del Barroco en la Catedral de Málaga. En Laca-rra-Ducay, M. C. El barroco en las catedrales españolas. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, Spain, pp. 233-278.
- Carvalho A. (1995). The Sabine equation and coupled spaces in churches. Proceedings of Inter-Noise 1995, Newport Beach, California, USA.
- Carvalho A. P. O. (1999). Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. *Appl. Acoust.*, 58, 33-49.
- Carvalho A. P. O., Morgado A. E. J., Henrique L. (1997). Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches. *Build. Acoust.*, 4, 1-20.
- Carvalho A. P. O., Nascimento B. (2011). Acoustical characterization of the underground chapels of the new Holy Trinity church in the Fatima shrine, Portugal. Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark.
- Carvalho A. P. O., Silva P. (2010). Sound, noise and speech at the 9000-seat Holy Trinity. *Arch. Acoust.*, 35, 145-156.
- Cerdá S., Giménez A., Cibrián R. M., Girón S., Zamarreño T. (2015). Subjective ranking of concert halls substantiated through orthogonal objective parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137, 580-584.
- Cerdá S., Giménez A., Romero J., Cibrián R., Miralles J. L. (2009). Room acoustical parameters: A factor analysis approach. *Appl. Acoust.*, 70, 97-109.
- Christensen C. L., Koutsouris G., Gil J., Rindel J. H. (2015). Applying in-situ recalibration for sound strength measurements in auditoria. Proceedings of the Institute of Acoustics 37, Pt.3, pp. 247-258.
- Chu W. T. (1978). Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 63, 1444-1450.
- Chu Y., Mak, C. M. (2009). Early energy decays in two churches in Hong Kong. *Appl. Acoust.*, 70(4), 579-587.
- Cirillo E., Martellotta F. (2006). Worship, acoustics and architecture. First edition, Multi-Science, Brentwood, UK.
- Cirillo E., Martellotta F. (2002). Acoustics of Apulian-Romanesque churches: an experimental survey. *Build. Acoust.* 9(4), 271-288.
- Cirillo E., Martellotta F. (2003). Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustical parameters. *Build. Acoust.*, 10, 55-76.
- Cirillo E., Martellotta F. (2005). Sound propagation and energy relations in churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 118, 232-248.
- Colomo A., Espinosa D., Zamarreño T., Girón S. (2012). Acústica de la cripta de la catedral de Cádiz, Spain. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- 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 Acust. United Acust.*, 92(1), 1-15.
- Dalenbäck B. I. (2011). CATT-Acoustic v9 powered by TUCT user manuals. Computer Aid-ed Theatre Technique; Gothenburg (Sweden).
- Dalenbäck B. I. L. (1999). Verification of prediction based on randomized tail-corrected cone-tracing and array modelling. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(2), 1173.
- Dalenbäck B.-I. L. (1996). Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100, 899-909.
- Dammerud J. J. (2011). In-situ calibration of the sound source level for measuring G. University of Bath, PhD candidate paper.
- De Vries D., Hulsebos E. M., Baan J. (2001). Spatial fluctuations in measures for spaciousness. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110, 947-954.
- Desarnaulds V. (2002). De l'acoustique des églises en Suisse – Une aproche pluridiciplinaire. Doctoral thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Desarnaulds V., Bossoney S. Eggenschwiler K. (1998). Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen. *Fortschritte der Akustic Proceedings of DAGA 1998*, Zürich, Switzerland, pp. 710-711.
- Desarnaulds V., Carvalho A. P. O., Monay G. (2002). Church acoustics and the influence of occupancy. *Build. Acoust.*, 9(1), 29-47.
- Desarnaulds V., Chauvin P., Carvalho A. P. O. (2001). Acoustic effectiveness of pulpit reflec-tor in churches. *Proceedings of the 17th ICA*, Rome, Italy.
- Engel Z., Kosala K. (2004). Reverberation indices in acoustic assessment of sacral struc-tures. *Arch. Acoust.*, 29, 45-59.
- Engel Z., Kosała K. (2007). Index method of the acoustic quality assessment of sacral build-ings. *Arch. Acoust.*, 32(3), 3-22.
- Esbret R. M., Ordaz J., Alonso J. J., Ruiz de Argandoña V. G., Montoto M., Marcos R., Valdeón L. (1988). Petrophysical characterization and weatherability of the stones of the Seville Cathedral. *Mater. Constr.*, 38, 5-23.
- Espinosa D., Zamarreño T., Girón S. (2010). Acoustics of the chapel of the former Mora hospital. *Proceedings of Inter-Noise 2010*, Lisbon, Portugal.
- Farina A. (2000). Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *Proceedings of AES 108th Convention*, Paris, France, pp. 5093.
- Fausti P., Farina A. (2000). Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *J. Sound Vib.*, 232(1), 213-229.
- Fearn R. W. (1975). Reverberation in Spanish, English and French churches. *J. Sound Vib.*, 43(3), 562-567.
- Foteinou A., Murphy D. T. (2014). Multi-positional acoustic measurements for auralization of St. Margaret's church, York, UK. *Proceedings of Forum Acusticum 2014*, Krakow, Poland.

- Gade A. C. (1989). Acoustical survey of eleven European concert halls. A basis for discussion of halls in Denmark. Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark.
- Gagliano A., Nocera F., Cicero A., Gioia M. C. (2015). Proposals and analysis of the effects of acoustic corrections in a modern church. *Build. Acoust.*, 22(3-4), 143-162.
- Gagliano A., Nocera F., Cicero A., Gioia M. C., Agrifoglio A. (2015). Analysis and acoustic correction of a Contemporary Italian church. *Energy Procedia*, 78, 1623-1628.
- Galindo M. (2003). La acústica en espacios religiosos católicos: Iglesias Gótico-Mudéjares. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- Galindo M., Bueno A. M., Léon A. L. Alberdi E. (2014). La energía acústica en el interior de un recinto: Estudio del modelo μ en iglesias postconciliares de M. Fisac. Proceedings of TecniAcústica 2014. Murcia, Spain, pp. 1308-1315.
- Galindo M., Girón S., Zamarreño T. (2008). Correlations of the acoustic fields of Mudejar-Gothic churches. *Build. Acoust.*, 15, 175-196.
- Galindo M., Girón S., Zamarreño T., León A. L. (2009). Simulación del soporte de escena en teatros andaluces. Proceedings of TecniAcústica 2009, Cadiz, Spain.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (1999). Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches. *Build. Acoust.*, 6(1), 1-16.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2000). Speech intelligibility in Mudejar-Gothic churches. *Acustica*, 86(2), 381-384.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2002). Comparative study of various techniques to measure speech intelligibility. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2002). Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Mudejar-Gothic churches. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2005). Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(5), 2873-2888.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2007). Predicted and measured acoustic parameters in churches. Proceedings of ISRA 2007, Seville, Spain.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2009). Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126 (3), 1207-1218.
- Galindo M., Zamarreño T., Girón S. (2010). Acustica virtual del escenario de teatros de proscenio andaluces. Proceedings of TecniAcústica 2010, Leon, Spain.
- Gamber K. (1993). The reform of the Roman liturgy: Its problems and background. Una Voce Press & the Foundation for Catholic Reform, San Juan Capistrano, California USA.
- Garrido J. A., Zamarreño T., Girón S. (2012). Virtual model to predict the acoustic fields of the Manuel de Falla auditorium of Granada (Spain). *Appl. Acoust.*, 73(9), 921-935.
- Garrido J. A., Zamarreño T., Girón S., Ruiz D. P. (2011). Perceived feasibility of computer-generated auralization in concert halls. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 153-162.
- Giménez A., Cibrián R. M., Cerdá S., Girón S., Zamarreño T. (2014). Mismatches between objective parameters and measured perception assessment in room acoustics: A holistic approach. *Build. Environ.*, 74, 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 Acust. United Acust.*, 97(6), 949-965.
- Girón S., Galindo M., Zamarreño T. (2008). Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches. *J. Sound Vib.*, 315(4-5), 1125-1142.
- Girón S., Zamarreño T., Álvarez-Morales L., Galindo M. (2015). Índices acústicos globales en grandes espacios de culto. *Proceedings of TecniAcústica 2015*, Valencia, Spain, pp. 1460-1467.
- Girón S., Zamarreño T., Bustamante P. (2012). Objective measures of spatial effects in Spanish concert halls. *Arch. Acoust.*, 37 (4), 529-547.
- Girón S., Zamarreño T., Galindo M. (2007). Acoustics in Mudejar-Gothic churches. *Proceedings of ISRA 2007*, Seville, Spain.
- Girón S., Zamarreño T., Galindo M. (2010). Experimental study of support parameters on auditorium and proscenium stages. *Acta Acust. United Acust.*, 96(6), 1026-1042.
- Griesinger D. (1996). Beyond MLS-Occupied hall measurement with FFT techniques. *Proceedings of AES 101st Convention*, Los Angeles, California, USA.
- Guidorzi P., Barbaresi L., D'Orazio D., Garai M. (2015). Impulse responses measured with MLS or swept-sine signals applied to architectural acoustics: An in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. *Energy Procedia*, 78, 1611-1616.
- Guski M., Vorländer M. (2014). Comparison of noise compensation methods for room acoustic impulse response evaluations. *Acta Acust. United Acust.*, 100, 320-327.
- Hak C. C. J. M., Wenmaekers R. H. C., Van Luxemburg L. J. C. (2012). Measuring room impulse responses: Impact of the decay ranges on derived room acoustic parameters. *Acta Acust. United Acust.*, 98, 907-915.
- Hak C. C. J. M., Wenmaekers R. H. C., Hak J. P. M. (2010). Sound strength calibration methods. *Proceedings of 20th ICA*, Sydney, Australia.
- Hak C. C. J. M., Hak J. P. M. (2007). Effect of stimulus speed error on measured room acoustic parameters. *Proceedings of 19th ICA*, Madrid, Spain.
- Howard D., Moretti L. (2009). Sound and space in Renaissance Venice. Yale University Press, London, UK.
- Huszty C., Sakamoto S. (2012). A note on the definition of signal-to-noise ratio of room impulse responses. *Acoust. Sci. Tech.*, 33(2), 117-120.
- International Electrotechnical Commission (IEC) 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Fourth edition 2011.
- Isla-Mingorance M. (1977). E. José de Bada y Navajas, arquitecto andaluz (1691-1755). Diputación provincial de Granada, Spain.
- ISO (2002). ISO/FDIS 9921 Ergonomics—Assessment of speech communication. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- ISO 3382-1:2009(E). Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- Katz B. F. G. (2004). International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Acoustic Research Letters Online*, 5, 158-164.
- Katz B. F. G. (2015). In situ calibration of the sound strength parameter. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138, 167-173.
- Keibs L., Kuhl W. (1959). Akustics der Thomaskirche in Leipzig. *Acustica*, 9, 365-370.
- Kleiner M., Klepper D. L., Torres R. R. (2010) Worship space acoustics. First edition, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, Florida, USA.
- Klepper D. L. (1996). The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(1), 417-425.
- Knudsen V. O., Harris C. M. (1988). Acoustical designing in architecture. Fifth edition. Acoustical Society of America, New York, USA.
- Kosała K. (2011). A single number index to assess selected acoustic parameters in churches with redundant information. *Arch. Acoust.*, 36(3), 545-560.
- Kosała K. (2012). Singular vectors in acoustic simulation tests of St. Paul the Apostle Church in Bochnia. *Arch. Acoust.*, 37(1), 23-30.
- Kosała K., Engel, Z. (2013). Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach. *Appl. Acoust.*, 74(10), 1144-1152.
- Koutsouris G. I., Brunskog J., Jeong C.-H., Jacobsen F. (2013). Combination of acoustical radiosity and the image source method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(6), 3963-3974.
- Kouzeleas S., Semidor C. (2001). The influence of the simplified architectural model on the acoustical simulation results. Proceedings of 17th ICA, Rome, Italy.
- Krockstadt A., Ström S., Sörsdal S. (1968). Calculating the acoustical room response by the use of a ray-tracing technique. *J. Sound Vib.*, 8, 118-125.
- Kürer R., Kurze U. (1968). Integrationsverfahren zur nachhallauswertung, (Integration procedure for evaluating reverberation). *Acustica*, 19, 313-322.
- Kuttruff K. H. (1993). Auralization of impulse responses modelled on the basis of ray-tracing results. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11), 876-880.
- León A. L. (2001). Acústica arquitectónica y patrimonio teatral en Andalucía. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- León A. L., Navarro J., Sendra J. J. (2000). Adjustment of reverberation in the rehabilitation of theaters. Its application to the architectural patrimony of theaters in Andalusia, Spain. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(5), 2892.
- León A. L., Navarro J., Sendra J. J., Suárez R. (2005). El sonido de los teatros andaluces. Revista de historia y teoría de la arquitectura, 6-7, 214-233.
- León A. L., Navarro J., Sendra J. J., Zamarreño T. (2002). Acoustics and theater rehabilitation in Andalucia. Proceedings of Forum Acusticum 2002, Seville, Spain.

- Lewers T. H., Anderson J. (1984). Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. *J. Sound Vib.*, 92(2), 285-297.
- Llordén A. (1988). Historia de la construcción de la Catedral de Málaga. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos, Malaga, Spain.
- López-Martín F. J., Álvarez-Morales L., Zamarreño T., Girón S. (2012). El sonido virtual del Panteón de Roma. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- Lottermoser W. (1952). Nachhallzainen in Barckkirchen. *Acustica*, 2, 109-111.
- Lundeby A., Vigran T. E., Bietz H., Vorländer M. (1995). Uncertainties of measurements in room acoustics. *Acustica*, 81, 344-355.
- Magrini A., Magnani L. (2005). Models of the influence of coupled spaces in Christian churches. *Build. Acoust.*, 12(2), 115-142.
- Magrini A., Ricciardi P. (2002). An experimental study of acoustical parameters in churches. *Int. J. Acoust. Vib.*, 7(3), 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.
- Magrini A., Ricciardi P. (2003). Churches as auditoria: Analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. *Build. Acoust.*, 10(2), 135-157.
- Marshall A. H., Gottlob D., Alrutz, H. (1978). Acoustical conditions preferred for ensemble. *J. Acoust. Soc. Am.*, 64(5), 1437-1442.
- Marshall A. H., Meyer J. (1985). The directivity and auditory impressions of singers. *Acustica*, 58, 130-140.
- Marshall L. G. (1996). An analysis procedure for room acoustics and sound amplification systems based on the early-to-late sound energy ratio. *J. Audio Eng. Soc.*, 44, 373-381.
- Martellotta F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *J. Sound Vib.*, 317(1-2), 378-399.
- Martellotta F. (2009). A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L). *J. Acoust. Soc. Am.*, 125, 1281-1284.
- Martellotta F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126, 1175-1186.
- Martellotta F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 654-663.
- Martellotta F. (2013). On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information. *Appl. Acoust.*, 74(8), 987-1000.
- Martellotta F., Álvarez-Morales L. (2014). Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesù in Rome: a comparison between different design options. Proceedings of Forum Acusticum 2014, Krakow, Poland.
- Martellotta F., Cirillo E. (2009). Experimental studies of sound absorption by church pews. *Appl. Acoust.*, 70, 441-449.

- Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P. (2008). Guidelines for acoustical measurements in churches. *Appl. Acoust.*, 70, 378-388.
- Martellotta F., Cirillo E., Della Crociata S., Gasparini E., Prezioso D. (2008). Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during the Baroque period: the effect of festive decorations. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 123, 3607.
- 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.
- Medina-Conde C. (1984). Descripción de la Santa Iglesia Catedral de Málaga desde 1487 de su erección hasta el presente de 1785. Facsímil Arquival, Málaga, Spain.
- 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.
- Mijic M. (2001). Serbian Orthodox church—an acoustical view. Proceedings of 17th ICA, Rome, Italy.
- Montell R., Giménez A., Cerdá S., Segura J., Cibrián R. M., Barba A. (2012). Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la catedral metropolitana de Valencia. Proceedings of Acústica 2012, Evora, Portugal.
- Montell R., Giménez A., Segura J., Planells 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., Mahiques L. V., Barba A., Giménez A. (2009). Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico. Proceedings of TecniAcústica 2009, Cadiz, Spain.
- Morgan D. R. (1997). A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(5), 2686-2693.
- Morimoto M., Jinya M., Nakagawa K. (2007). Effects of frequency characteristics of reverberation time on listeners envelopment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122, 1611-1615.
- Mourjopoulos J., Papadakos C., Kamaris G. (2014). Optimal acoustic reverberation Evaluation of Byzantine chanting in churches. Michigan Publishing, University of Michigan Library, Ann Arbor, USA.
- 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 J., Sendra J. J., Muñoz S. (2009). The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. *Appl. Acoust.*, 70(6), 781-789.

- Navascués-Palacio P. (2010). Catedrales de España. First edition, Lunwerg, Barcelona, Spain.
- Niemas M., Sadowski J., Engel Z. (1998). Acoustic issues of sacral structures. *Arch. Acoust.*, 23(1), 87-104.
- Okano T., Beranek L. L., Hidaka T. (1998). Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, 255-265.
- Parkin P., Taylor J. H. (1952). Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral. Experimental system using line-source loudspeakers and time delays. *Wireless World*, 58, 54-57.
- Patent No. 7,023,453. IBM SPSS Statistics 19 Core System, User's Guide Licensed Materials—Property of SPSS Inc., an IBM Company. ©Copyright SPSS Inc. 1989, 2010.
- 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.
- Pedrero A., Ruiz R., Díaz-Chyla A., Díaz C. (2014). Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses. *Appl. Acoust.*, 85, 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.
- Pelorsor X., Vian J-P. (1992). On the variability of room acoustical parameters: reproducibility and statistical validity. *Appl. Acoust.*, 37, 175-198.
- Planells A., Girón S., Zamarreño T., Giménez A. (2015). Estudio experimental del soporte de escena en teatros y auditorios. *Proceedings of TecniAcústica 2015*, Valencia, Spain, 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 María de la Murta (in Augmented and virtual reality, pp. 457-464). Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Policardi F. (2011). MLS and Sine-Sweep technique comparison in room-acoustic measurements. *Elektrotehniški Vestnik*, 78, 91-95.
- Prieto L., Lamarca R., Casado A. (1998). Assessment of the reliability of clinical findings: the intraclass correlation coefficient. *Med. Clin.*, 110, 142-145.
- Queiroz-de-Sant'Ana D., Trombetta-Zannin P. H. (2011). Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Build. Environ.*, 46(2), 511-517.
- Queiroz-de-Sant'Ana D., Trombetta-Zannin P. H. (2014). Acoustic evaluation of a Baroque church through measurements, simulation, and statistical analysis. *Canadian Acoust.*, 42(1), 3-21.
- Raes A. C., Sacerdote G. (1953). Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas. *J. Acoust. Soc. Am.*, 25, 925-961.

- 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. (1995). Computer simulation techniques for acoustical design of rooms. *Acoust. Aust.*, 23, 81-86.
- Rindel J. H. (2002). Modelling in auditorium acoustics. From ripple tank and scale models to computer simulations. *Revista de Acústica*, 33(3-4), 31-35.
- Rodriguez-Mariño R. (2015). Optimisation of room acoustics in an anthroposophic church (Degree dissertation). Polytechnic University of Valencia, Spain.
- San Martín R., Arana M., Machín J., Arregui A. (2013). Impulse source versus dodecahedral loudspeaker for measuring parameters derived from the impulse response in room acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 134(1), 275-284.
- San Martín R., Arregui A., Machín J., Arana M. (2014). Comparison of measured and simulated room acoustic parameter values using high resolution grids. *Acoust. Aust.*, 42(1), 27-30.
- San Martín R., Witew I. B., Arana M., Vorländer M. (2007). Influence of the source orientation on the measurement of acoustic parameters. *Acta Acust. United Acust.*, 93, 387-397.
- Savioja L. (1999). Modeling techniques for virtual acoustics. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- Schroeder M. (1981). Modulation transfer functions: definition and measurement. *Acta Acust. United Acust.*, 49, 179-182.
- Schroeder M. R. (1965). New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, 409-412.
- Schroeder M. R., Atal B. S., Bird C. (1962). Digital computers in room acoustics. Proceedings of 4th ICA, Copenhagen, Denmark.
- Segura J., Giménez A., J. Romero J., Cerdá 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 Acust. United Acust.*, 97(1), 155-170.
- Segura J., Romero J., Navasquillo J., Giménez A., Cerdá 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.
- 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.
- 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, Universidad de Sevilla, Spain.
- Sendra J. J., Navarro J., Zamarreño T. (1999). La acústica de las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla. Colección Textos de Doctorado, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Spain.
- Sendra J. J., Navarro J., Zamarreño T., León A. L. (1999). Propuestas para la rehabilitación acústica de iglesias: El ejemplo de la iglesia de San Francisco de Baeza (España). Proceedi-

- nings of IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Torremolinos, Spain, pp. 244-245.
- Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1997). An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches (in Computational Acoustics and its Environmental Applications II, pp. 139-148, eds. Brevia C. A., Kenny J., Ciskowski R. D.). Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1998). Acoustical behaviour of churches: Mudejar-Gothic churches. Meeting Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(5), 2996.
- Sendra J. J., Zamarreño T., Navarro J. (1999). Acoustics in churches (in Computational Acoustics in Architecture, pp. 133-177). Witpress, Southampton, UK.
- Shankland R. S., Shankland H. K. (1971). Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.*, 50, 389-396.
- 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. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(2), 1206-1220.
- Soeta Y., Shimokura R., Kim Y. H., Ohsawa T., Ito K. (2013). Measurement of acoustic characteristics of Japanese Buddhist temples in relation to sound source location and direction. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(5), 2699-2710.
- Stan G. B., Embrechts J. J., Archambeau D. (2002). Comparison of different impulse response measurement techniques. *J. Audio Eng. Soc.*, 50(4), 249-262.
- Steeneken H. J. M., Houtgast T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 318-326.
- Sü Z., Yilmazer S. (2008). The acoustical characteristics of the Kocatepe mosque in Ankara, Turkey. *Arch. Sci. Rev.*, 51(1), 21-30.
- Suárez R. (2002). El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico. Doctoral thesis. University of Seville, Spain.
- Suárez R., Alonso A., Sendra J. J. (2015). Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. *J. Cult. Herit.*, 16(2), 239-243.
- Suárez R., Alonso A., Sendra J. J. (2016). Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. *J. Cult. Herit.*, 19, 567-572.
- Suárez R., Sendra J. J., Alonso A. (2013). Acoustics, liturgy and architecture in the early Christian church. From the domus ecclesiae to the basilica. *Acta Acust. United Acust.*, 99, 292-301.
- Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2004). The acoustics of the cathedral-mosque of Cordoba. Proposals for architectural intervention. *Acta Acust. United Acust.*, 90(2), 362-375.
- Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2005). The sound of the cathedral-mosque of Cordoba. *J. Cult. Herit.*, 6(4), 307-312.
- Suárez R., Sendra J. J., Navarro J., León A. L. (2006). Espacios acoplados en la mezquita-catedral de Córdoba: el sonido de los límites. *Inf. Constr.*, 58(501), 23-31.

- Suberbiola-Martínez J. (2001). Fuentes para la historia de la construcción de la Catedral de Málaga, 1528-1542. 1^a edición, Servicio de Publicaciones y Divulgación Científica, Universidad de Málaga, Spain.
- Sumarac-Pavlovic D., Mijic M. (2001). Preferred reverberation time of Serbian Orthodox churches. Proceedings of 17th ICA, Rome, Italy.
- Svensson P., Kristiansen U. R. (2002). Computational modelling and simulation of acoustic spaces. Proceedings of AES 22nd International Conference, Espoo, Finland.
- Sygulska A. (2015). Contemporary two-storey churches-acoustic investigations. *J. Arch. Urb.*, 39(2), 140-148.
- 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.
- Torras-Rosell A., Jacobsen F. (2010). Measuring long impulse responses with pseudorandom sequences and sweep signals. Proceedings of Inter-Noise 2010, Lisbon, Portugal.
- Torres-Balbás L. (1960). La alcazaba y la Catedral de Málaga. Los monumentos cardinales de España (24). Plus-Ultra, Madrid, Spain.
- Tzekakis E. (1979). Data on the acoustics of the Byzantine churches of Thessaloniki. *Acustica*, 43, 275-279.
- 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. (1989). Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1), 172-178.
- Vorländer M. (1995). International round robin on room acoustical computer simulations. Proceedings of 15th ICA, Trondheim, Norway.
- Vorländer M. (2008). Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. First edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Vorländer M. (2011). Models and algorithms for computer simulations in room acoustics. Proceedings of ISVA 2011, Valencia, Spain, pp. 72-82.
- Vorländer M. (2013). Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 1203-1213.
- Vorländer M., Mommertz, E. (2000). Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Appl. Acoust.*, 60(2), 187-199.
- Wang L. M., Rathsam J., Ryherd S. R. (2004). Interactions of model detail level and scattering coefficients in room acoustic computer simulation. Proceeding of ISRA 2004, Kyoto, Japan.
- 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.

- Xiang N. (1995). Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach. *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 2112-2121.
- 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 TecniAcústica 95*, La Coruña, Spain, pp. 7-10.
- Zamarreño T., Galindo M., Girón S. (2001). Ruido modulado versus MLS para la medida de parámetros de inteligibilidad: Primera aproximación. *Proceedings of TecniAcústica 2001*, Logroño, Spain.
- 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 Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121, 234-250.
- Zamarreño T., Girón S., Galindo M. (2008). Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-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, Spain, pp. 69-72.

Appendix 1: Technical reports of the Andalusian cathedrals

This appendix contains the technical sheets generated for each studied cathedral, and, where appropriate, for the singular spaces independently characterised within a number of these cathedrals. Additionally, a glossary is included, in which both the terminology and the acoustic parameters used for the characterisation are briefly defined.

Each technical report is structured into three parts: The description of the space, in which its construction process is summarised and its interior architecture is depicted, highlighting the distribution and the geometry of the space, as well as the predominant finishing materials; The details of the measurement session, which describe both the equipment used and the methodology followed to acoustically characterise the space; and last but not least, the results, listing the values of the acoustic parameters both spectrally and spatially averaged for each source position considered.

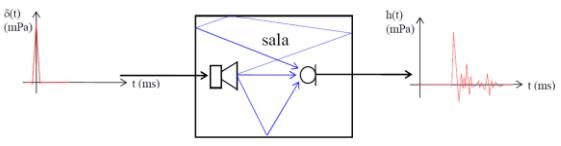
GLOSARIO DE TÉRMINOS

Norma base	UNE-EN-ISO 3382-1:2010
Parámetros	<p>Respuesta al impulso (RI) ($p(t)$ [Pa]) relación señal – ruido de pico (INR [dB]), Tiempo de reverberación (T_{30} [s]), tiempo de reverberación inicial (EDT[s]), tiempo central (T_S [ms]), claridad (C_{80} [dB]), definición (D_{50}), fuerza sonora (G [dB]), nivel sonoro lateral final (L_J [dB]), fracción de energía lateral precoz (J_{LFm}), calidez acústica (BR), brillo (B_r), coeficiente de correlación cruzada interaural (IACC_x), Speech Transmission Index (STI), Rapid Speech Transmission Index (RASTI).</p> <p>Es común presentar promedios espectrales para caracterizar el comportamiento de cada parámetro. En tal caso se añade el subíndice "m", tal como se hace en la columna formulación.</p>

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y NOMENCLATURA

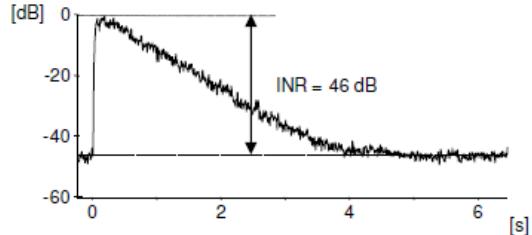
FORMULACIÓN

Respuesta al impulso o impulsiva (RI): La respuesta al impulso es la señal que caracteriza el comportamiento de un sistema, lineal e invariante en el tiempo (LTI), en el dominio del tiempo, ante una entrada determinada. En el dominio de la frecuencia se trabaja con su transformada de Fourier, es decir, la respuesta en frecuencia del sistema. En otras palabras, la respuesta al impulso caracteriza el comportamiento acústico de nuestro sistema, y ofrece información tanto del sonido directo como de las reflexiones que llegan a dicho punto.



$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) * h(t) \\ &\downarrow \text{TF} \\ Y(\omega) &= X(\omega) \times H(\omega) \end{aligned}$$

Relación señal – ruido de pico (INR): Es la relación existente entre el nivel de pico de la respuesta al impulso y el nivel de presión del ruido de fondo. La relación INR puede entenderse como un calificador de la respuesta al impulso relacionado con el rango de caída necesario establecido en la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.



$$INR = L_{IR} - L_N [dB]$$

Tiempo de reverberación (T): Tiempo requerido para que la energía acústica en un recinto disminuya a su millonésima parte (decaiga 60 dB) una vez que cese la emisión de la fuente. En la práctica es difícil conseguir una curva de decaimiento energético suficiente, por lo que se definen otros parámetros como el T_{30} , que se calcula extrapolando linealmente hasta 60 dB a partir de la pendiente de la caída de -5 a -35 dB (m-5:-35) con respecto al nivel máximo.

$$T_{30} = \frac{60}{m_{-5:-35}} [s]$$

$$T_{30m} = \frac{T_{500Hz} + T_{1kHz}}{2} [s]$$

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y NOMENCLATURA	FORMULACIÓN
<p>Tiempo de reverberación inicial (EDT): Se define como el tiempo de reverberación, calculado a partir de la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB ($m_{0:-10}$) del decaimiento sonoro. Proporciona información sobre las primeras reflexiones que se producen en un recinto. El EDT se correlaciona con la reverberación percibida mejor que el T_{30}.</p>	$EDT = \frac{60}{m_{0:-10}} [s]$ $EDT_m = \frac{EDT_{500Hz} + EDT_{1kHz}}{2} [s]$
<p>Tiempo central (T_s): Describe el balance entre la energía inicial, o precoz, y la tardía, sin fijar un límite de tiempo determinado. Se define como la coordenada temporal del centro de gravedad de la respuesta al impulso cuadrática. Este parámetro está relacionado con la nitidez del sonido.</p>	$T_s = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} [ms]$ $T_{s,m} = \frac{T_{s,500Hz} + T_{s,1kHz}}{2} [ms]$
<p>Claridad (C_{80}): La claridad relaciona la energía precoz y tardía en cada receptor, considerando normalmente como precoz la que llega al mismo en los primeros 80 ms tras la llegada del sonido directo. Con este parámetro se cuantifica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales que integran un mensaje, es decir, la claridad del sonido percibido y el equilibrio entre la claridad y la reverberación.</p> <p>Alternativamente se consideran los primeros 50 ms, (C_{50}, para la palabra). Este parámetro está relacionado con la definición, que se define a continuación.</p>	$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,080} p^2(t)dt}{\int_{0,080}^{\infty} p^2(t)dt} [dB]$ $C_{80m} = \frac{C_{80,500Hz} + C_{80,1kHz}}{2} [dB]$ $C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,050} p^2(t)dt}{\int_{0,050}^{\infty} p^2(t)dt} [dB]$ $C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) [dB]$
<p>Definición (D_{50}): Este parámetro relaciona la energía precoz percibida en los primeros 50 ms, medidos desde la llegada del sonido directo, y la energía total. La definición cuantifica el grado de comprensión de un mensaje y por tanto se relaciona con la inteligibilidad.</p>	$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}$ $D_{50m} = \frac{D_{50,500Hz} + D_{50,1kHz}}{2}$
<p>Fuerza Sonora (G): Se define G como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente sonora omnidireccional calibrada, en un determinado punto de la sala, y el nivel de presión sonora producido por dicha fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m de ella. Determina el grado de amplificación que produce la sala en función del sonido emitido, al tiempo que proporciona una idea sobre la distribución de nivel del sonido en dicha sala. Se puede determinar a partir de la respuesta al impulso como se muestra a la derecha.</p>	$G = L_{pE} - L_{pE,10} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t)dt} = [dB]$ $G_m = \frac{G_{500Hz} + G_{1kHz}}{2} [dB]$

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y NOMENCLATURA	FORMULACIÓN
<p>Nivel sonoro lateral final (L_J): Se define como la relación entre la energía lateral que llega al receptor después de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, (normalmente medida con un micrófono con patrón de directividad en figura de ocho) y la energía omnidireccional total recibida a una distancia de 10 m en campo libre. Este parámetro está relacionado con la envolvente o la espacialidad percibida por el oyente en el punto caracterizado del auditorio</p>	$L_J = 10 \log \frac{\int_{0,080}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} [dB]$ $L_{J,avg} = 10 \log \left[0,25 \sum_{i=1}^4 10^{\frac{L_{Ji}}{10}} \right] [dB]$ <p>*i representa a cada una de las cuatro bandas de octavas: 125, 250, 500 y 1000 Hz.</p>
<p>Fracción de energía lateral precoz (J_{LF}, J_{LFC}): El parámetro J_{LF} se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al receptor dentro de los primeros 80 ms contados a partir de la llegada del sonido directo (captada con un micrófono con directividad en figura de ocho) y la energía recibida proveniente de todas direcciones (captada con un micrófono omnidireccional) en el mismo intervalo de tiempo. También suele hacerse una ponderación subjetiva con $\cos\theta$ para obtener el J_{LFC}, como se muestra en las ecuaciones de la derecha. La fracción de energía lateral precoz está relacionada con la anchura aparente de la fuente.</p>	$J_{LF} = \frac{\int_{0,005}^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt}; \quad J_{LFC} = \frac{\int_{0,005}^{0,080} p \cdot p_L(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt}$ $J_{LFm} = \frac{J_{LF,125Hz} + J_{LF,250Hz} + J_{LF,500Hz} + J_{LF,1kHz}}{4}$
<p>Calidez acústica (BR): Este parámetro es la razón del tiempo de reverberación a bajas frecuencias frente al de frecuencias medias. Ha sido sugerido como una medida de la <i>calidez</i> o respuesta de la sala a las frecuencias bajas.</p>	$BR = \frac{T_{30,125Hz} + T_{30,250Hz}}{T_{30,500Hz} + T_{30,1kHz}}$
<p>Brillo (Br): Se calcula como la razón de los tiempos de reverberación a altas frecuencias respecto de los valores de las medias frecuencias. Da una idea del nivel de <i>brillo</i> de la sala (sonido claro y rico en armónicos).</p>	$Br = \frac{T_{30,2kHz} + T_{30,4kHz}}{T_{30,500Hz} + T_{30,1kHz}}$
<p>Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC_x): Es el valor máximo de la correlación entre las señales que llegan a los oídos izquierdo y derecho, y se expresa en valores que van desde -1 (señales izquierda y derecha idénticas pero no en fase) a +1 (señales idénticas). El 0 indica que las señales no están correlacionadas en absoluto. Este parámetro está relacionado con la percepción del ancho aparente de la fuente (ASW) y la sensación de inmersión o envolvimiento de la fuente (LEV). En función del intervalo de integración de la señal se definen tres parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> - IACC_A (Total): $t_1=0; t_2=\infty$. - IACC_E (Reflexiones tempranas): $t_1=0; t_2=80$ ms. - IACC_L (Sonido reverberante): $t_1=80$ ms; $t_2=\infty$ 	$IACC_x = \max \left \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t)p_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \right $ $IACC_{xm} = \frac{IACC_{x,500Hz} + IACC_{x,1kHz} + IACC_{x,2kHz}}{3}$

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y NOMENCLATURA	FORMULACIÓN																																																																																
<p>Índice de transmisión de la palabra (STI): El <i>Speech Transmission Index</i>, STI, es un parámetro de cuantificación de la inteligibilidad basado en la medida de la pérdida de la profundidad de la modulación de las señales sonoras en los puntos de escucha, producida, fundamentalmente, por la reverberación y el ruido de fondo. Su valor sería 0 si la inteligibilidad en la sala fuera nula y 1 si la inteligibilidad fuese óptima. Para su determinación se utilizan las 7 bandas de octava centradas en F_0 con $125 \text{ Hz} \leq F_0 \leq 8 \text{ kHz}$ y, para cada una de ellas, 14 frecuencias de modulación F_m, con $0.63 \text{ Hz} \leq F_m \leq 12.5 \text{ Hz}$ separadas en tercios de octava. Es posible valorarla a partir de la respuesta al impulso.</p> <p>Rapid Speech Transmission Index (RASTI): Este parámetro es una versión simplificada del STI. Dicha simplificación consiste en reducir el número de bandas de octava a considerar ($F_{01}= 500 \text{ Hz}$ y $F_{02}=2 \text{ kHz}$) y el de frecuencias de modulación (3 para la banda de 500 Hz y 4 para la de 2 kHz) con respecto al cálculo del STI. $(S/N)_{ap}$ es la relación señal ruido aparente y n es el número final de octavas consideradas.</p>	$STI = \frac{\overline{(S/N)_{ap}} + 15}{30}$ $\overline{(S/N)_{ap}} =$ $= 0,01\overline{(S/N)_{ap}}(125) + 0,042\overline{(S/N)_{ap}}(250)$ $+ 0,129\overline{(S/N)_{ap}}(500)$ $+ 0,2\overline{(S/N)_{ap}}(1k) 0,312\overline{(S/N)_{ap}}(2k)$ $+ 0,25\overline{(S/N)_{ap}}(4k) + 0,057\overline{(S/N)_{ap}}(8k)$ $\overline{(S/N)_{ap}}(F_o) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_o, F_m)}{n}$ $(S/N)_{ap}(F_o, F_m) = 10 \log \frac{m(F_o, F_m)}{1 - m(F_o, F_m)}$ $m(F_o, F_m) =$ $= \left \frac{\int_0^\infty p(t, F_o) ^2 e^{-j2\pi F_o t} dt}{\int_0^\infty p(t, F_o) ^2 dt} \right \frac{1}{1 + 10^{-S/N(F_o)/10}}$																																																																																
TABLA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro acústico</th> <th>Bandas de octava consideradas [Hz]</th> <th>Bandas de octava promediadas¹ [Hz]</th> <th>Umbral diferencial JND²</th> <th>Rango Típico³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T_{30} [s]</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>Rel. 5%</td> <td>1 s ; 3 s</td> </tr> <tr> <td>EDT[s]</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>Rel. 5%</td> <td>1 s ; 3 s</td> </tr> <tr> <td>T_S [ms]</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>10 ms⁴</td> <td>60 ms ; 260 ms</td> </tr> <tr> <td>C_{80} [dB]</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>1 dB⁴</td> <td>-5 dB ; +5 dB</td> </tr> <tr> <td>D_{50}</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>0,05</td> <td>0,3 ; 0,7</td> </tr> <tr> <td>G [dB]</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 1k</td> <td>1 dB</td> <td>-2 dB ; +10 dB</td> </tr> <tr> <td>L_j [dB]</td> <td>125 – 4k</td> <td>125 – 1k</td> <td>Desconocido</td> <td>-14 dB ; +1 dB</td> </tr> <tr> <td>J_{LF}</td> <td>125 – 4k</td> <td>125 – 1k</td> <td>0,05</td> <td>0,05 ; 0,35</td> </tr> <tr> <td>BR</td> <td>125 – 1k</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>B_r</td> <td>500 – 4k</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>IACC_E</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 2k</td> <td>0,075</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>IACC_L</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 2k</td> <td>0,075</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>IACC_A</td> <td>125 – 4k</td> <td>500 – 2k</td> <td>0,075</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>STI⁵</td> <td>125 – 8k</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>RASTI⁵</td> <td>500 y 2k</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>		Parámetro acústico	Bandas de octava consideradas [Hz]	Bandas de octava promediadas ¹ [Hz]	Umbral diferencial JND ²	Rango Típico ³	T_{30} [s]	125 – 4k	500 – 1k	Rel. 5%	1 s ; 3 s	EDT[s]	125 – 4k	500 – 1k	Rel. 5%	1 s ; 3 s	T_S [ms]	125 – 4k	500 – 1k	10 ms ⁴	60 ms ; 260 ms	C_{80} [dB]	125 – 4k	500 – 1k	1 dB ⁴	-5 dB ; +5 dB	D_{50}	125 – 4k	500 – 1k	0,05	0,3 ; 0,7	G [dB]	125 – 4k	500 – 1k	1 dB	-2 dB ; +10 dB	L_j [dB]	125 – 4k	125 – 1k	Desconocido	-14 dB ; +1 dB	J_{LF}	125 – 4k	125 – 1k	0,05	0,05 ; 0,35	BR	125 – 1k	-	-	-	B_r	500 – 4k	-	-	-	IACC _E	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-	IACC _L	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-	IACC _A	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-	STI ⁵	125 – 8k	-	-	-	RASTI ⁵	500 y 2k	-	-	-
Parámetro acústico	Bandas de octava consideradas [Hz]	Bandas de octava promediadas ¹ [Hz]	Umbral diferencial JND ²	Rango Típico ³																																																																													
T_{30} [s]	125 – 4k	500 – 1k	Rel. 5%	1 s ; 3 s																																																																													
EDT[s]	125 – 4k	500 – 1k	Rel. 5%	1 s ; 3 s																																																																													
T_S [ms]	125 – 4k	500 – 1k	10 ms ⁴	60 ms ; 260 ms																																																																													
C_{80} [dB]	125 – 4k	500 – 1k	1 dB ⁴	-5 dB ; +5 dB																																																																													
D_{50}	125 – 4k	500 – 1k	0,05	0,3 ; 0,7																																																																													
G [dB]	125 – 4k	500 – 1k	1 dB	-2 dB ; +10 dB																																																																													
L_j [dB]	125 – 4k	125 – 1k	Desconocido	-14 dB ; +1 dB																																																																													
J_{LF}	125 – 4k	125 – 1k	0,05	0,05 ; 0,35																																																																													
BR	125 – 1k	-	-	-																																																																													
B_r	500 – 4k	-	-	-																																																																													
IACC _E	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-																																																																													
IACC _L	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-																																																																													
IACC _A	125 – 4k	500 – 2k	0,075	-																																																																													
STI ⁵	125 – 8k	-	-	-																																																																													
RASTI ⁵	500 y 2k	-	-	-																																																																													

¹ El promediado en frecuencia se hace con la media aritméticas de los valores a las correspondientes bandas de octava, excepto para el L_j , que se debe promediar energéticamente.

² Just Noticeable Difference.

³ Valores promediados en posiciones únicas en salas polifuncionales vacías de hasta 25.000 m³, según la UNE-EN-ISO 3382-1.

⁴ En el caso de espacios muy reverberantes (es el caso de grandes iglesias y catedrales) *Martellotta* ha comprobado que el valor del JND es relativo para el T_S (8.5%) y del orden de 1,5 dB para la C_{80} .

⁵ Los valores presentados aquí se han calculado a partir de la respuesta al impulso sin calibrar, es decir no se considera el efecto del ruido de fondo, si bien en estas situaciones el efecto dominante es la reverberación.

PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*

UACC
INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA			
Espacio	Catedral de Cádiz		
Ubicación	Plaza de la Catedral, nº 7, 11005, Cádiz		
Página web oficial	http://www.catedraldecadiz.com		
Fechas relevantes	Año de construcción de la Catedral	1722 - 1838	
	Año de construcción de la Cripta de la Catedral	1730 - 1732	
	Catalogada Bien de Interés Cultural (BIC), monumento	Noviembre 2000	
Estilo arquitectónico	Barroco, rococó y neoclásico		
Arquitectos destacados	Vicente Acero y Juan Daura		

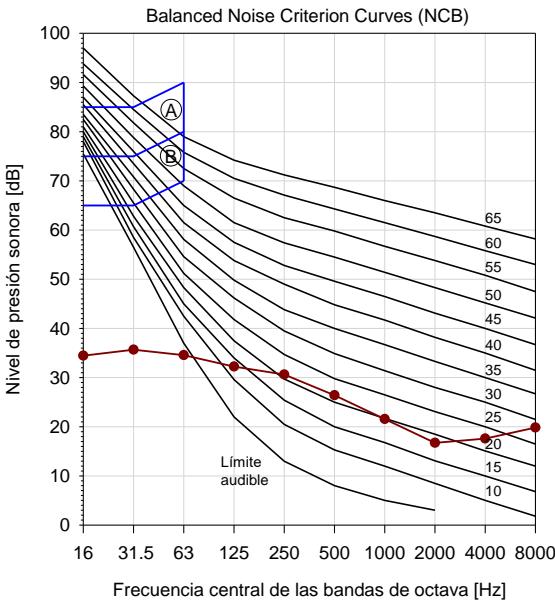
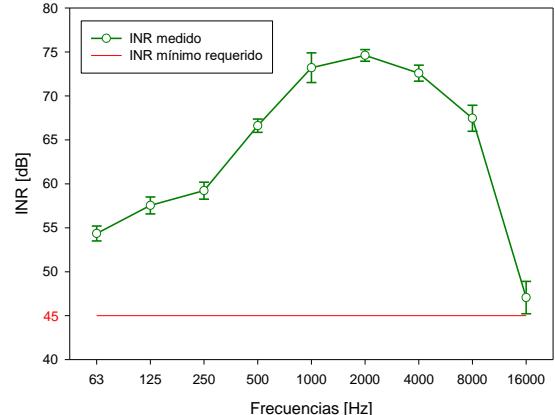
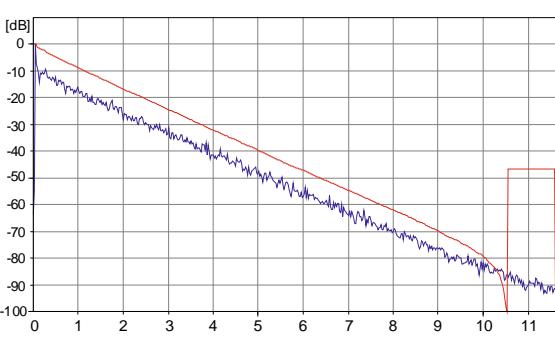
Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La catedral de Cádiz, también conocida por los habitantes de la ciudad andaluza como la Catedral Nueva, se localiza en el perímetro del casco histórico urbano, muy próxima al mar (Fig. 1).</p> <p>El inicio de su construcción está datado en 1722, año en el que se coloca la primera piedra de una obra proyectada inicialmente por el arquitecto Vicente Acero.</p> <p>El proceso constructivo se prolongó durante 116 años, bajo la dirección e influencia de siete maestros diferentes, por lo que no predomina la existencia de un estilo arquitectónico único, sino la combinación y mezcla de tres estilos diferentes: el Barroco y Rococó prevalece principalmente en los espacios interiores, mientras que la fachada y las torres pertenecen al Neoclásico (Fig.2).</p> <p>En 1796, a consecuencia de importantes acontecimientos, como la Guerra de la Independencia o la restauración del Régimen Absolutista de Fernando VII, se paralizan los trabajos. Juan Daura fue el arquitecto responsable de la reanudación y finalización de las obras en 1838.</p> <p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>El templo catedralicio posee planta de cruz latina y se articula en tres naves, siendo la central la de mayor anchura y altura.</p> <p>La estructura está conformada por una serie de columnas corintias estriadas revestidas de mármol y rematadas en un friso decorado de rocallas con una serpenteante cornisa. Sobre dicho remate emerge un segundo cuerpo al que se adosa una serie de pilastres de piedra caliza sobre las que descansa un entramado de bóvedas vaídas profusamente decoradas (Fig. 3).</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior.</p>  <p>Figura 2. Vista Exterior. Fachada.</p>  <p>Figura 3. Vista interior desde el altar. Naves y columnas.</p>

Descripción del espacio	Fotografías															
<p>La cabecera del templo está formada por una girola circular que delimita la capilla mayor (Fig. 4), en la que se localiza el altar mayor con forma de templete circular, sustentado por columnas pareadas corintias de mármol, jaspes rojos y capiteles en bronce. A ambos lados del altar, se encuentran dos bellísimos púlpitos en bronce dorado. El presbiterio se cubre con una cúpula y horadada en su base por grandes ventanas (Fig. 5) que, junto a la existencia de numerosas vidrieras, iluminan con luz natural el espacio interior de la catedral. Bajo el altar mayor se encuentra la singular cripta, situada bajo el nivel del mar.</p>																
<p>Las capillas laterales se distribuyen prácticamente en la totalidad del perímetro de la iglesia, a excepción de los pies y el crucero, sobre el que descansa una gran cúpula semiesférica, obra de Juan Daura, compuesta por un tambor y asentada sobre pechinas, recubierta de cerámica amarilla en el exterior.</p>																
<p>Uno de los principales espacios que conforman el templo, el coro, está ubicado en uno de los tramos de la nave central (Fig. 6). Cabe destacar la existencia de dos grandes órganos que flanquean este espacio a ambos lados. La hermosa sillería, está realizada en maderas de cedro y caoba, y se compone de un primer cuerpo que cuenta con cuarenta asientos de respaldo alto, y un segundo cuerpo compuesto por veinticinco asientos.</p> <h3 data-bbox="174 1268 571 1298">REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</h3> <ul style="list-style-type: none"> - Primer cuerpo de columnas corintias de mármol; segundo cuerpo de pilastras de piedra caliza. - Muros y bóvedas de piedra caliza. - Solería de mármol. - Púlpitos: antepecho y tornavoz de bronce dorado. - Retablos de madera y de mármol. - Sillería del coro de madera. - Bancos de madera. - Majestuoso tabernáculo de mármol, jaspe y bronce. 																
<p>Tabla 1. Datos geométricos del espacio.</p> <table border="1" data-bbox="174 1808 1357 2010"> <thead> <tr> <th data-bbox="174 1808 373 1897" rowspan="2">Volumen</th> <th colspan="3" data-bbox="373 1808 1103 1897">Dimensiones máximas del templo (catedral)</th> <th data-bbox="1103 1808 1230 1897" rowspan="2">Naves</th> <th data-bbox="1230 1808 1357 1897" rowspan="2">Capillas</th> </tr> <tr> <th data-bbox="373 1897 627 1920">Altura</th> <th data-bbox="627 1897 881 1920">Longitud</th> <th data-bbox="881 1897 1103 1920">Anchura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="174 1897 373 2010">$\approx 70.000 \text{ m}^3$</td><td data-bbox="373 1897 627 2010">28,8 m (nave central) 18,6 m (nave lateral) 45,5 m (cúpula)</td><td data-bbox="627 1897 881 2010">85 m</td><td data-bbox="881 1897 1103 2010">60 m</td><td data-bbox="1103 1897 1230 2010">3</td><td data-bbox="1230 1897 1357 2010">16</td></tr> </tbody> </table>	Volumen	Dimensiones máximas del templo (catedral)			Naves	Capillas	Altura	Longitud	Anchura	$\approx 70.000 \text{ m}^3$	28,8 m (nave central) 18,6 m (nave lateral) 45,5 m (cúpula)	85 m	60 m	3	16	
Volumen		Dimensiones máximas del templo (catedral)					Naves	Capillas								
	Altura	Longitud	Anchura													
$\approx 70.000 \text{ m}^3$	28,8 m (nave central) 18,6 m (nave lateral) 45,5 m (cúpula)	85 m	60 m	3	16											

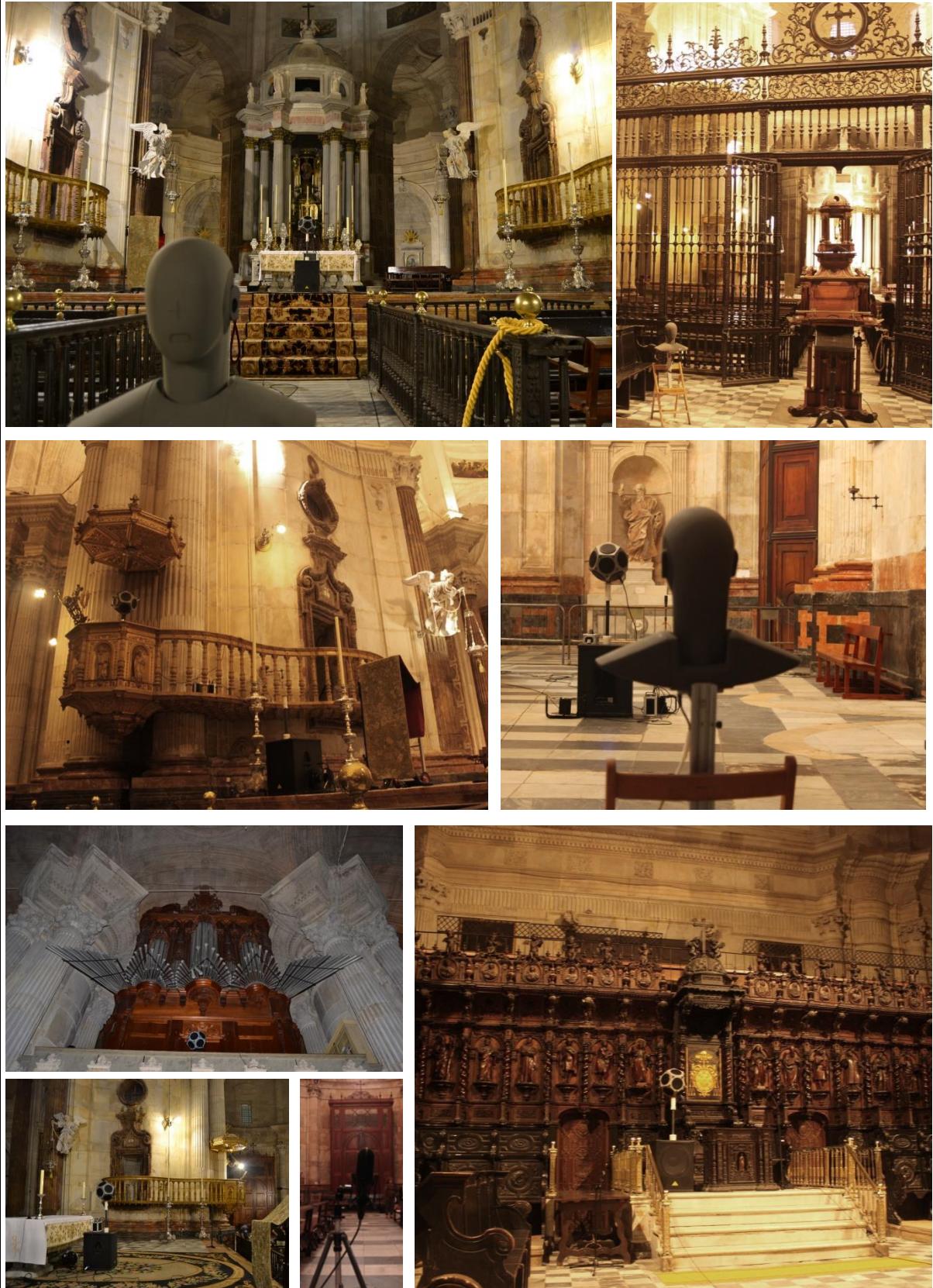
Medición acústica															
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS															
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.</p> <p>Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 20 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de congregación/audiencia, aprovechando la simetría del recinto (Fig. 7).</p>															
<p>Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.</p> <table border="1"> <tr> <td>Norma aplicada</td><td>UNE-EN-ISO 3382-1:2010</td></tr> <tr> <td>Fecha</td><td>04-05/06/2012</td></tr> <tr> <td>Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad rel.)</td><td>21-24°C / 75-77%</td></tr> <tr> <td>Nivel de ocupación</td><td>Desocupado</td></tr> <tr> <td>Nº posiciones de fuente</td><td>5 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)</td></tr> <tr> <td>Nº de receptores</td><td>20 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)</td></tr> <tr> <td>Señal de excitación</td><td><i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 40 s <i>Rango frecuencias:</i> 63 - 16000 Hz</td></tr> </table>		Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010	Fecha	04-05/06/2012	Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad rel.)	21-24°C / 75-77%	Nivel de ocupación	Desocupado	Nº posiciones de fuente	5 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)	Nº de receptores	20 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)	Señal de excitación	<i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 40 s <i>Rango frecuencias:</i> 63 - 16000 Hz
Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010														
Fecha	04-05/06/2012														
Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad rel.)	21-24°C / 75-77%														
Nivel de ocupación	Desocupado														
Nº posiciones de fuente	5 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)														
Nº de receptores	20 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)														
Señal de excitación	<i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 40 s <i>Rango frecuencias:</i> 63 - 16000 Hz														
<p>Nota: La caracterización acústica de la cripta, será presentada en una ficha independiente.</p>															
<p>Figura 7. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).</p>															
Tabla 3. Resumen de posiciones de la fuente y receptores caracterizados.															
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5										
Ubicación de la fuente	Altar mayor	Púlpito	Coro	Trascoro	Órgano										
Nº total de receptores caracterizados	14	12	6	4	7										
Receptores con sonido directo	R1 R9 R2 R10 R3 R11 R4 R12 R5 R13 R6 R14 R7 R11 R8 R12	R1 R13 R6 R15 R7 R20 R8 R9 R10 R11 R11 R12	R4 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12	R16 R17 R18 R19	R1 R13 R15										
Receptores sin sonido directo		R4			R6 R9 R7 R20										

Nota:

La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

Medición acústica																																															
EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN																																															
<p>El proceso de generación y adquisición de la señal se ha llevado a cabo con el programa WinMLS2004, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101 de 8 canales. La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro. Las RIs monoaurales se capturaron con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización SoundField SMP200; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza binaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p> <p>El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 28,7 dBA. En la Fig. 8 se representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NCB, que se puede valorar como NCB-30.</p> <p>La relación señal – ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (Fig. 9).</p> <p>Tabla 4. Valores espectrales de la relación señal ruido impulsiva (INR [dB]) promediados espacialmente (M) y su dispersión valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frec.[Hz]</th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F1</td> <td>M EE</td> <td>55,89 0,51</td> <td>57,58 0,33</td> <td>65,76 0,40</td> <td>77,17 0,73</td> <td>76,14 0,62</td> <td>72,50 0,44</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>M EE</td> <td>56,54 0,47</td> <td>58,04 0,36</td> <td>66,69 0,47</td> <td>74,37 0,71</td> <td>74,52 0,26</td> <td>72,14 0,35</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>M EE</td> <td>56,92 1,67</td> <td>58,45 1,15</td> <td>64,30 1,94</td> <td>67,27 1,77</td> <td>72,23 0,93</td> <td>69,87 1,05</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>M EE</td> <td>61,33 1,33</td> <td>62,95 0,84</td> <td>68,73 0,67</td> <td>72,15 0,44</td> <td>74,70 1,13</td> <td>75,55 0,64</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>M EE</td> <td>57,07 2,90</td> <td>59,13 3,00</td> <td>67,60 3,29</td> <td>75,10 3,64</td> <td>75,50 2,08</td> <td>72,90 2,80</td> </tr> </tbody> </table> <p>Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder (Fig. 10).</p>	Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	F1	M EE	55,89 0,51	57,58 0,33	65,76 0,40	77,17 0,73	76,14 0,62	72,50 0,44	F2	M EE	56,54 0,47	58,04 0,36	66,69 0,47	74,37 0,71	74,52 0,26	72,14 0,35	F3	M EE	56,92 1,67	58,45 1,15	64,30 1,94	67,27 1,77	72,23 0,93	69,87 1,05	F4	M EE	61,33 1,33	62,95 0,84	68,73 0,67	72,15 0,44	74,70 1,13	75,55 0,64	F5	M EE	57,07 2,90	59,13 3,00	67,60 3,29	75,10 3,64	75,50 2,08	72,90 2,80
Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000																																									
F1	M EE	55,89 0,51	57,58 0,33	65,76 0,40	77,17 0,73	76,14 0,62	72,50 0,44																																								
F2	M EE	56,54 0,47	58,04 0,36	66,69 0,47	74,37 0,71	74,52 0,26	72,14 0,35																																								
F3	M EE	56,92 1,67	58,45 1,15	64,30 1,94	67,27 1,77	72,23 0,93	69,87 1,05																																								
F4	M EE	61,33 1,33	62,95 0,84	68,73 0,67	72,15 0,44	74,70 1,13	75,55 0,64																																								
F5	M EE	57,07 2,90	59,13 3,00	67,60 3,29	75,10 3,64	75,50 2,08	72,90 2,80																																								
 <p>The graph plots sound pressure level (dB) against the center frequency of octave bands (Hz). It shows a red curve with dots representing measured data, which stays above the NCB-30 curve (labeled 'INR mínimo requerido'). The y-axis ranges from 0 to 100 dB, and the x-axis ranges from 16 to 8000 Hz. Reference curves for NCB values from 10 to 65 are shown.</p>																																															
<p>Figura 8. Nivel espectral del ruido de fondo medido representado sobre las curvas NCB.</p>																																															
 <p>This line graph shows the average measured INR (green line with open circles) and the required minimum INR (red horizontal line at 45 dB) across different frequencies. The measured INR increases from approximately 55 dB at 63 Hz to a peak of about 75 dB at 2000 Hz, then decreases sharply to around 45 dB at 16000 Hz.</p>																																															
<p>Figura 9. Valor promedio espacial de la relación señal-ruido impulsiva.</p>																																															
 <p>This graph shows energy decay over time (0 to 11 seconds) on a logarithmic scale. A blue line with noise represents the energy decay, while a red line represents the ideal Schroeder integral. A sharp drop in energy occurs around 10.5 seconds, likely due to a microphone switch.</p>																																															
<p>Figura 10. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el receptor 08 filtradas a 1 kHz.</p>																																															

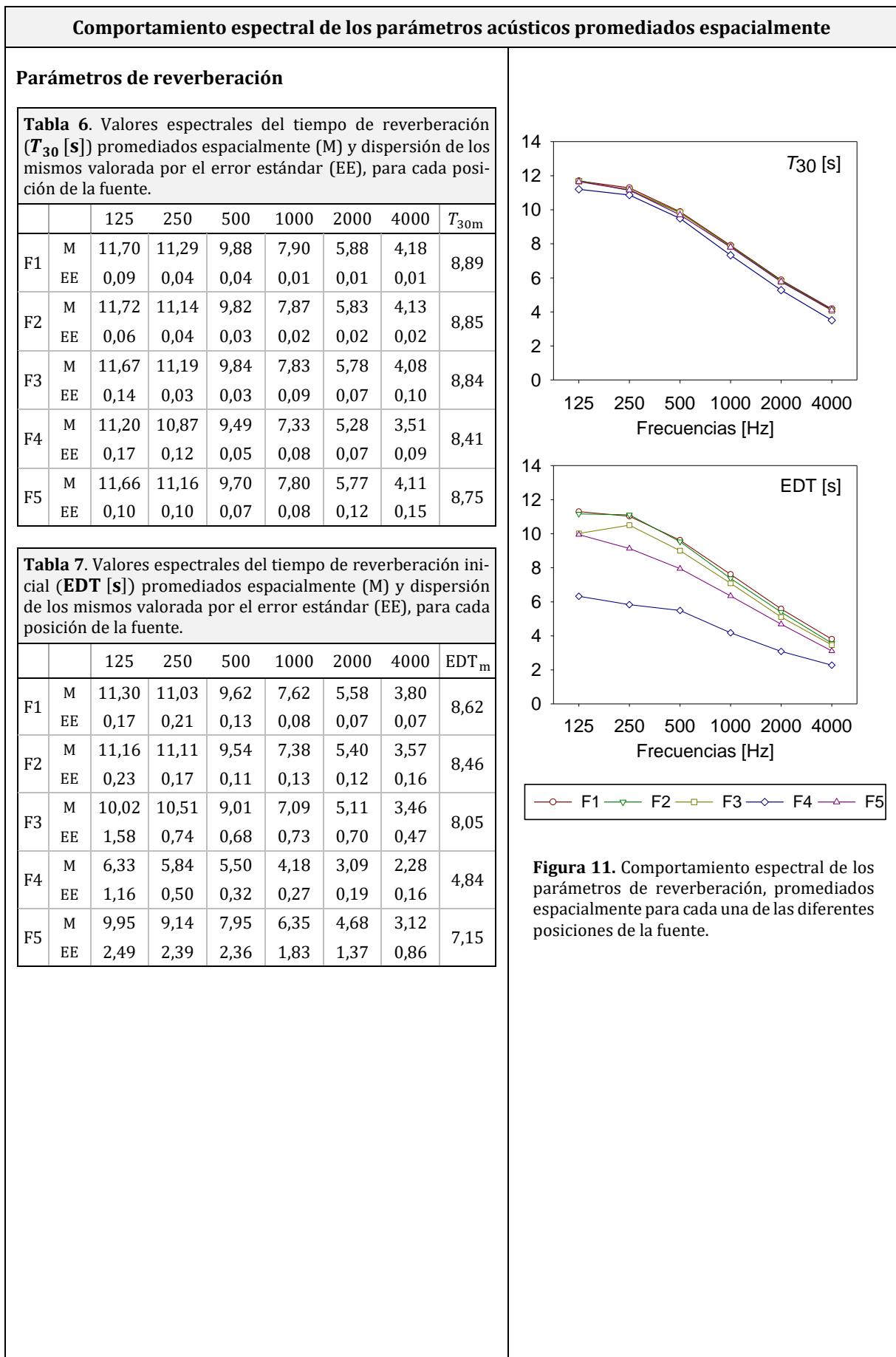
Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas



Parámetros acústicos promediados espectralmente					
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente^a.					
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5
Ubicación de fuente	Altar mayor	Púlpito	Coro	Trascoro	Órgano
T_{30m} [s]	8,89	8,85	8,84	8,41	8,75
EDT_m [s]	8,62	8,46	8,05	4,84	7,15
T_{Sm} [ms]	610,46	534,18	553,33	299,88	547,67
C_{50m} [dB]	-10,29	-6,63	-8,01	-4,63	-10,25
C_{80m} [dB]	-8,44	-5,49	-6,60	-2,88	-7,67
D_{50m}	0,12	0,22	0,20	0,27	0,14
G_m [dB]	1,87	2,56	1,64	6,93	2,48
$L_{J,avg}$ [dB]	-2,51	-2,48	-3,74	0,77	-1,90
J_{LFm}	0,16	0,16	0,14	0,26	0,15
BR^b	1,29	1,29	1,29	1,31	1,30
B_r^b	0,57	0,56	0,56	0,52	0,56
$IACC_{Em}$	0,47	0,55	0,48	0,30	0,61
$IACC_{Lm}$	0,11	0,10	0,11	0,11	0,15
$IACC_{Am}$	0,17	0,22	0,19	0,15	0,22
$RASTI^b$	0,25	0,33	0,31	0,40	0,28
STI^b	0,30	0,38	0,37	0,43	0,33

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.



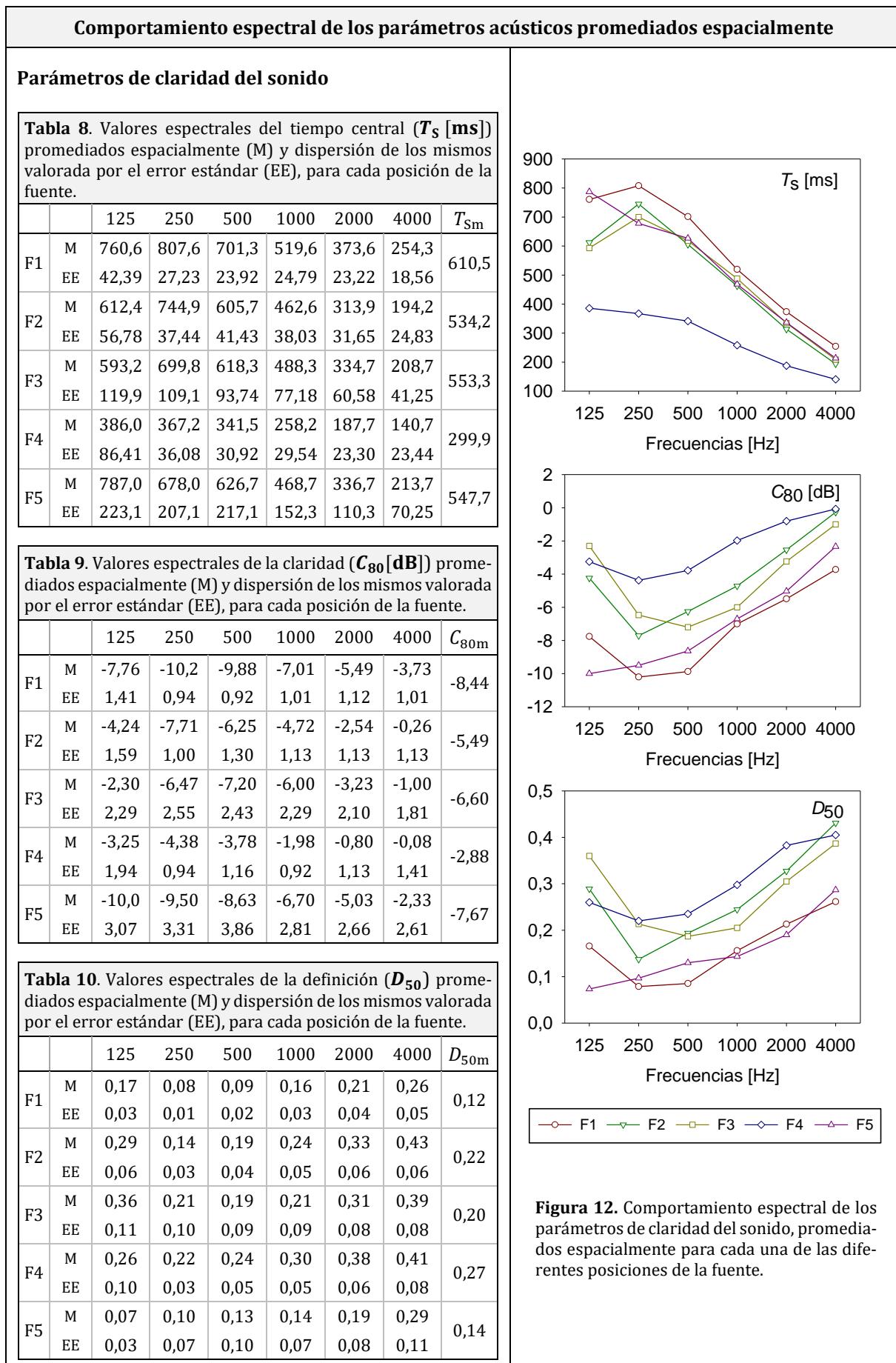
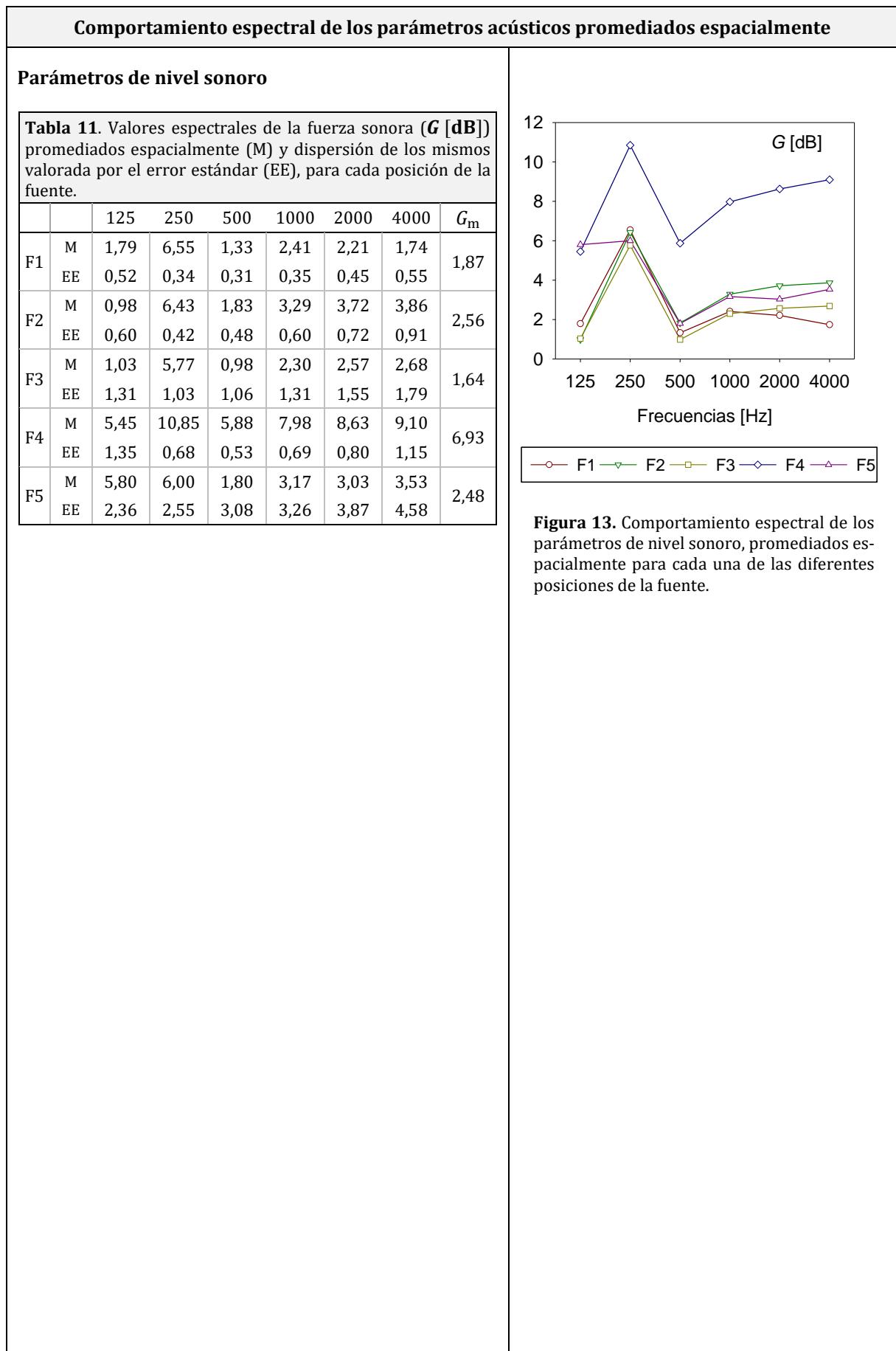
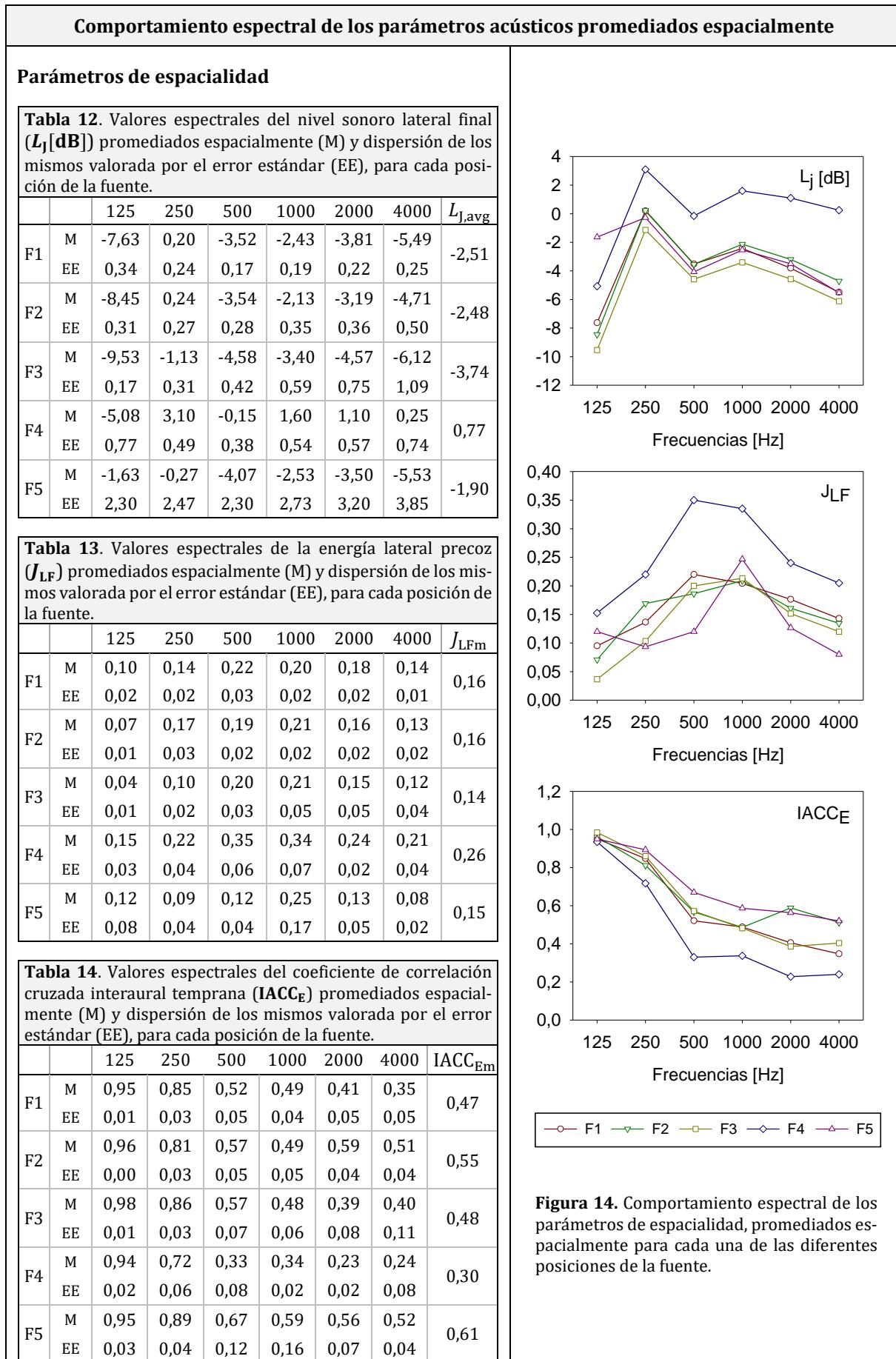


Figura 12. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.





Comportamiento de los parámetros acústicos de inteligibilidad frente a la distancia fuente-receptor y promedio espacial

Parámetros de inteligibilidad

Tabla 15. Valores medios del índice de medida de la inteligibilidad (**RASTI**), promediados espacialmente para cada posición de la fuente.

	RASTI
F1	0,25
F2	0,33
F3	0,31
F4	0,40
F5	0,28

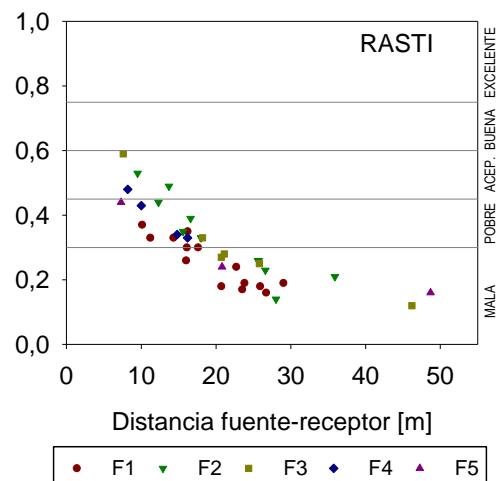


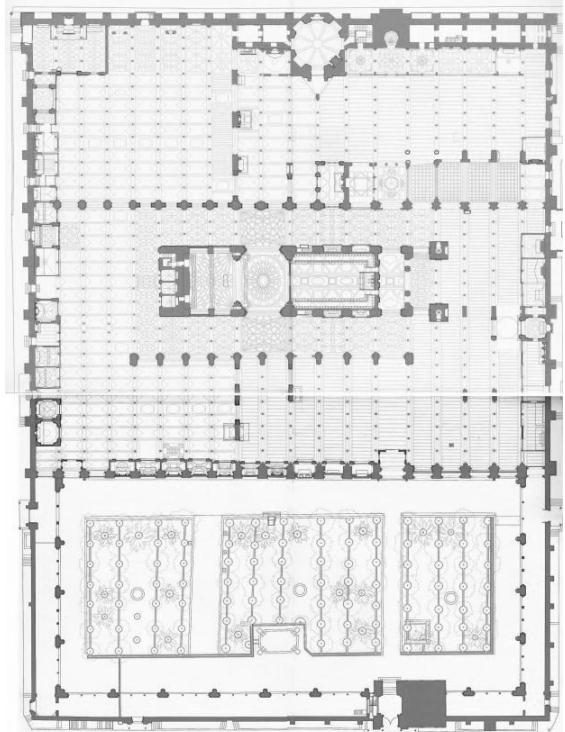
Figura 15. Valores del índice RASTI obtenidos en cada punto receptor considerado para cada posición de la fuente, representados en función de la distancia fuente-receptor correspondiente.

PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*

UACC
INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA

Espacio	Mezquita-Catedral de Córdoba	
Ubicación	c/ Cardenal Herrero, 1, 14003, Córdoba	
Página web oficial	http://www.catedralcordoba.es	
Fechas relevantes	Año de construcción de la Mezquita	785 - 1001
	Consagración como Catedral: Capilla Ntra. Sra. de Villaviciosa	1236
	Años de construcción de las actuales capilla mayor, crucero y coro	1516-1747
	Año de declaración como Patrimonio de la Humanidad	1984
Estilo arquitectónico	Arábigo-renacentista	
Arquitectos destacados	Hernán Ruiz, el Viejo y su hijo.	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La Catedral Mezquita de Córdoba (Fig. 1), se localiza al sur del centro histórico de la ciudad andaluza, próxima a una de las orillas del río Guadalquivir. Se trata de uno de los conjuntos monumentales más asombrosos del mundo, siendo a su vez el reflejo artístico del Califato de Córdoba, uno de los estados políticos más importantes de occidente a lo largo de la historia.</p> <p>Se conoce la existencia de una antigua iglesia visigoda datada en el siglo V, de la que apenas se han podido recuperar restos. Ésta sería derribada con objeto de construir en su solar la mezquita original, iniciada bajo el mandato de Abderramán I en el año 785, que constaría de once naves longitudinales. Con el fin de alojar a mayor número de fieles, Abderramán II decidió ampliar hacia el sur el templo prolongando las arquerías ocho tramos más, obra finalizada en el 855. Un siglo después, en 970, bajo el mandato de Alhakén II, se llevó a cabo la ampliación más importante, añadiendo, entre otros, doce nuevos tramos a la sala de oración. La última de las intervenciones, llevada a cabo por Almanzor a finales del siglo X, fue la más extensa de todas. En esta ocasión, tanto el oratorio como el patio se extienden hacia el este una longitud equivalente a ocho naves, delimitando la superficie total del edificio, 179 metros de largo por 128 metros de ancho (Fig. 2).</p> <p>En 1236, tras la conquista cristiana, la mezquita fue consagrada como catedral católica. La transformación interior del edificio musulmán comienza en siglo XV, pero fue en 1521 cuando, bajo el mandato de Hernán Ruiz, comenzó a construirse una basílica renacentista en el centro de sus naves, que sería finalizada en el Barroco.</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior.</p>  <p>Figura 2. Planta de la Mezquita Aljama Almóhade sobre la planta actual.</p>

Descripción del espacio	Fotografías
<p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>El espacio interior se conforma por un bosque de más de un millar de columnas y capiteles, que delimitan las 19 naves longitudinales que articulan el templo, siendo la más ancha aquella que desemboca en el antiguo Mihrab islámico (Fig. 3), una joya arquitectónica revestida de mosaicos bizantinos, formada por una pequeña estancia octogonal cubierta con una cúpula con forma de concha. Durante la etapa cristiana también fueron delimitadas una serie de capillas laterales a lo largo del perímetro del templo. Con el fin de introducir mayor iluminación natural, se construyen 4 lucernarios con bellas cúpulas nervadas. Sobre cada una de las columnas se elevan pilares rectangulares de sillería, entre los que se trazan dobles arquerías dicromáticas (Fig. 4) que proporcionan estabilidad al sistema estructural. El arco inferior, hace funciones de entibio, mientras que el superior soporta la cubierta. Una serie de entrevigados de madera, en ocasiones tallado y pintado, o una seriación de bóvedas de arista cubren las distintas naves longitudinales del edificio.</p>	
<p>En el centro del tejido de la mezquita, se inserta el espacio catedralicio, constituido por la Capilla Mayor (Fig. 5), el crucero (Fig. 6), coronado por una gran cúpula elíptica, y el coro, cubierto por una bóveda de cañón, en el que se ubica el majestuoso órgano y donde se talló una sillería barroca de madera, obra de Pedro Duque de Cornejo.</p>	
<p>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Columnas de mármol, jaspe y granito. - Arcos de herradura y medio punto dicromáticos: dovelas rojas de ladrillo y dovelas amarillentas de piedra caliza, a excepción de las arquerías ubicadas en la ampliación de Almanzor, donde todas son de piedra caliza. - Solería de mármol y terrazo. - Mihrab: mármol, estuco y mosaicos bizantinos. - Entrevigado de madera. - Bóvedas de piedra o de enlucido de yeso. - Retablos de madera y de mármol. - Sillería del coro y bancos de madera. - Rejas de hierro. 	
	

Tabla 1 Datos geométricos del espacio.

Volumen	Dimensiones máximas del templo (Mezquita)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
≈134.700 m ³	13 m	179 m	128 m	19	37+Villaviciosa y capilla Real
Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
≈22.114 m ³	35 m	60 m	40 m	1	-

Medición acústica							
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS							
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.</p> <p>Se han considerado 6 posiciones de la fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 31 posiciones de micrófonos distribuidos por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (Fig. 7).</p>							
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.							
Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010						
Fecha	30-31/01/2012 01/02/2012						
Condiciones ambientales (T^a / Humedad relativa)	10°C / 45-50%						
Ocupación del recinto	Desocupado						
Nº Posiciones de la fuente	6 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)						
Nº de receptores	31 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)						
Señal de excitación	Tipo: Barrido exponencial sinusoidal Duración: 30 s Rango de frecuencias: 63 – 16000 Hz						
Tabla 3. Resumen de posiciones de la fuente y los receptores caracterizados.							
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
Ubicación de la fuente	Altar Mayor	Coro	Púlpito	Capilla de Villaviciosa	Mihrab	Ampliación Almanzor	
Número total de receptores	17	11	16	8	8	8	
Receptores con sonido directo	R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8	R9 R11 R12 R13 R16 R6 R11	R1 R2 R3 R4 R5 R7 R8 R9 R11	R12 R16 R15 R18 R19 R20 R21 R22 R24	R14 R15 R18 R19 R20 R23 R24 R25 R26	R14 R15 R17 R22 R23 R24 R25 R26	R27 R28 R29 R31
Receptores sin sonido directo	R10 R14 R15 R17	R8 R12 R15 R17	R1 R10 R13 R14	R15 R17	-	-	R8 R12 R15 R17

Nota:

La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

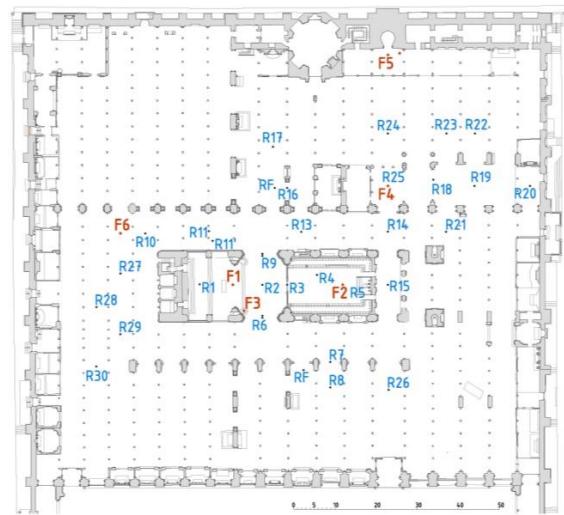


Figura 7. Planta de la mezquita-catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).

Medición acústica																																																													
EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN																																																													
<p>El proceso de generación, adquisición y procesado de la señal se ha llevado a cabo con el programa WinMLS2004, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro.</p> <p>Las RIs monoaurales se capturaron con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización SoundField SMP200; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza binaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p>																																																													
<p>El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 27,2 dBA. La Figura 8 muestra el espectro del ruido de fondo sobre las curvas NCB, que se puede valorar como NCB-30. La relación señal/ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (Fig. 9).</p>																																																													
<p>Tabla 4. Valores espectrales de la relación señal ruido impulsiva (INR [dB]) promediados espacialmente (M) y su dispersión valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frec.[Hz]</th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F1</td> <td>M EE</td> <td>73,7 1,56</td> <td>72,2 1,19</td> <td>71,7 1,26</td> <td>71,3 1,20</td> <td>72,2 1,20</td> <td>68,0 1,36</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>M EE</td> <td>74,6 1,59</td> <td>73,1 1,41</td> <td>72,9 1,22</td> <td>71,9 1,00</td> <td>72,0 0,97</td> <td>67,1 1,68</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>M EE</td> <td>76,4 0,92</td> <td>74,0 1,27</td> <td>71,0 1,65</td> <td>67,9 2,11</td> <td>68,9 2,07</td> <td>65,7 1,62</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>M EE</td> <td>77,6 1,21</td> <td>76,3 0,80</td> <td>74,7 1,31</td> <td>75,0 1,48</td> <td>76,5 1,22</td> <td>71,3 1,29</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>M EE</td> <td>74,4 2,28</td> <td>73,1 2,45</td> <td>71,4 2,09</td> <td>70,6 1,65</td> <td>69,5 2,54</td> <td>63,1 2,40</td> </tr> <tr> <td>F6</td> <td>M EE</td> <td>72,1 3,21</td> <td>73,6 1,63</td> <td>75,3 1,00</td> <td>72,2 1,87</td> <td>71,9 2,03</td> <td>65,9 2,34</td> </tr> </tbody> </table>							Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	F1	M EE	73,7 1,56	72,2 1,19	71,7 1,26	71,3 1,20	72,2 1,20	68,0 1,36	F2	M EE	74,6 1,59	73,1 1,41	72,9 1,22	71,9 1,00	72,0 0,97	67,1 1,68	F3	M EE	76,4 0,92	74,0 1,27	71,0 1,65	67,9 2,11	68,9 2,07	65,7 1,62	F4	M EE	77,6 1,21	76,3 0,80	74,7 1,31	75,0 1,48	76,5 1,22	71,3 1,29	F5	M EE	74,4 2,28	73,1 2,45	71,4 2,09	70,6 1,65	69,5 2,54	63,1 2,40	F6	M EE	72,1 3,21	73,6 1,63	75,3 1,00	72,2 1,87	71,9 2,03	65,9 2,34
Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000																																																							
F1	M EE	73,7 1,56	72,2 1,19	71,7 1,26	71,3 1,20	72,2 1,20	68,0 1,36																																																						
F2	M EE	74,6 1,59	73,1 1,41	72,9 1,22	71,9 1,00	72,0 0,97	67,1 1,68																																																						
F3	M EE	76,4 0,92	74,0 1,27	71,0 1,65	67,9 2,11	68,9 2,07	65,7 1,62																																																						
F4	M EE	77,6 1,21	76,3 0,80	74,7 1,31	75,0 1,48	76,5 1,22	71,3 1,29																																																						
F5	M EE	74,4 2,28	73,1 2,45	71,4 2,09	70,6 1,65	69,5 2,54	63,1 2,40																																																						
F6	M EE	72,1 3,21	73,6 1,63	75,3 1,00	72,2 1,87	71,9 2,03	65,9 2,34																																																						
<p>Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder (Fig. 10).</p>																																																													
<p>Figura 8. Nivel del ruido de fondo medido sobre curvas NCB.</p>																																																													
<p>Figura 9. Valor promedio espacial de la relación señal - ruido impulsiva.</p>																																																													
<p>Figura 10. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el receptor 3 filtradas a 1 kHz.</p>																																																													

Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas



Parámetros acústicos promediados espectralmente						
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente ^a .						
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ubicación de la fuente	Altar mayor	Coro	Púlpito	Capilla Villaviciosa	Mihrab	Ampl. Almanzor

T_{30m} [s]	4,73	4,51	4,76	3,95	4,23	4,40
EDT_m [s]	4,63	4,07	4,56	3,24	4,07	3,58
T_{Sm} [ms]	309,12	305,57	264,25	236,81	275,06	253,88
C_{50m} [dB]	-5,72	-8,19	-3,39	-6,13	-5,56	-5,84
C_{80m} [dB]	-4,38	-5,71	-2,24	-3,91	-3,96	-3,58
D_{50m}	0,25	0,21	0,32	0,21	0,22	0,22
G_m [dB]	3,34	2,65	2,15	5,06	0,87	-1,43
$L_{J,avg}$ [dB]	-3,27	-4,81	-4,59	-2,23	-6,30	-8,67
J_{LFm}	0,15	0,18	0,20	0,16	0,11	0,14
BR^b	1,09	1,10	1,08	1,01	1,03	1,07
B_r^b	0,64	0,62	0,63	0,62	0,64	0,65
IACC _{Em}	0,50	0,43	0,49	0,54	0,65	0,44
IACC _{Lm}	0,13	0,15	0,12	0,17	0,24	0,12
IACC _{Am}	0,27	0,23	0,29	0,30	0,35	0,20
RASTI ^b	0,37	0,36	0,44	0,39	0,35	0,37
STI ^b	0,45	0,42	0,50	0,45	0,41	0,42

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.

Comportamiento espectral de los parámetros acústicos promediados espacialmente								
Parámetros de reverberación								
Tabla 6. Valores espectrales del tiempo de reverberación (T_{30} [s]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.								
		125	250	500	1000	2000	4000	T_{30m}
F1	M	5,09	5,22	5,01	4,45	3,54	2,51	4,73
	EE	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	
F2	M	4,92	5,00	4,81	4,20	3,30	2,27	4,51
	EE	0,11	0,06	0,07	0,09	0,07	0,09	
F3	M	5,10	5,21	5,03	4,49	3,54	2,48	4,76
	EE	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	
F4	M	3,79	4,22	4,20	3,71	2,91	2,00	3,95
	EE	0,12	0,10	0,07	0,08	0,05	0,04	
F5	M	4,23	4,43	4,48	3,97	3,19	2,24	4,23
	EE	0,20	0,20	0,18	0,17	0,16	0,12	
F6	M	4,66	4,74	4,68	4,11	3,36	2,38	4,40
	EE	0,09	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	
Tabla 7. Valores espectrales del tiempo de reverberación inicial (EDT [s]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.								
		125	250	500	1000	2000	4000	EDT_m
F1	M	4,90	4,98	4,92	4,34	3,42	2,32	4,63
	EE	0,26	0,24	0,21	0,21	0,20	0,13	
F2	M	4,16	4,51	4,32	3,82	2,92	1,99	4,07
	EE	0,52	0,43	0,43	0,35	0,30	0,27	
F3	M	4,84	5,05	4,85	4,26	3,21	2,03	4,56
	EE	0,25	0,17	0,19	0,18	0,17	0,13	
F4	M	3,02	3,34	3,32	3,15	2,57	1,71	3,24
	EE	0,20	0,15	0,19	0,16	0,14	0,11	
F5	M	3,80	4,33	4,31	3,82	3,07	1,97	4,07
	EE	0,46	0,40	0,33	0,23	0,20	0,12	
F6	M	3,55	4,22	3,67	3,48	2,91	1,95	3,58
	EE	0,42	0,58	0,36	0,38	0,29	0,21	

T_{30} [s]

Frecuencias [Hz]

EDT [s]

Frecuencias [Hz]

—○— F1 —▽— F2 —□— F3 —◇— F4 —△— F5 —○— F6

Figura 11. Comportamiento espectral de los parámetros de reverberación, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.

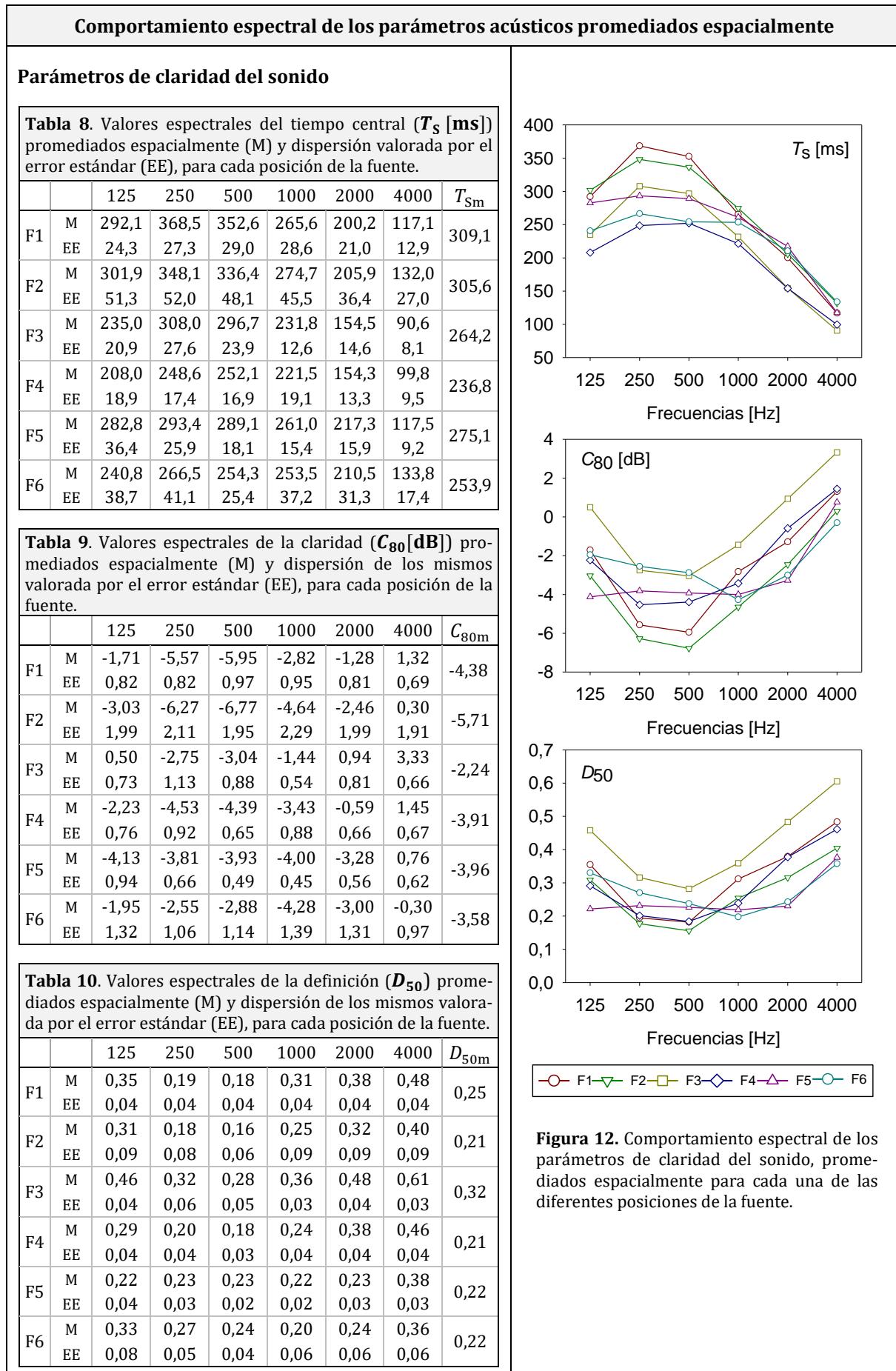
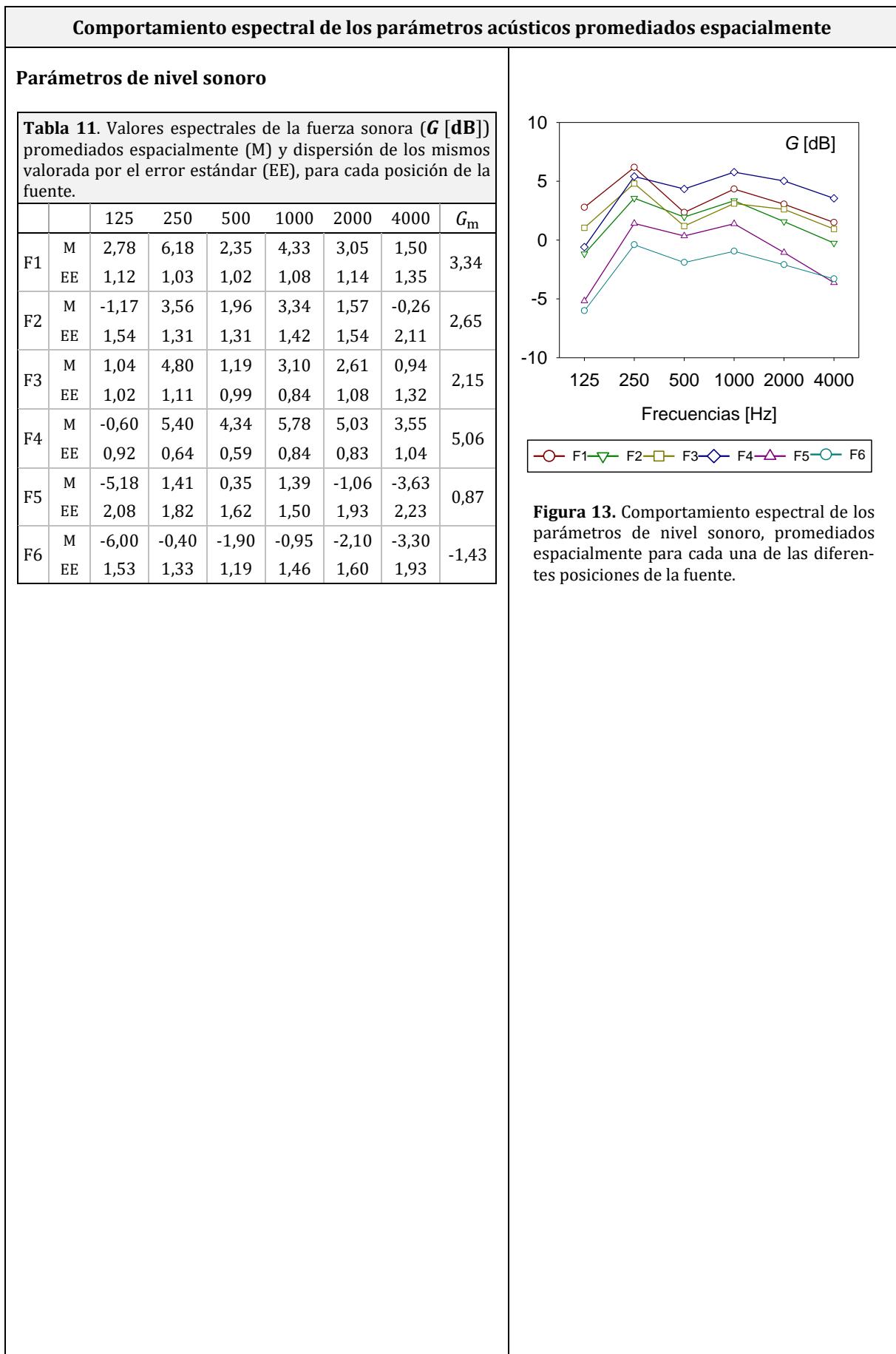
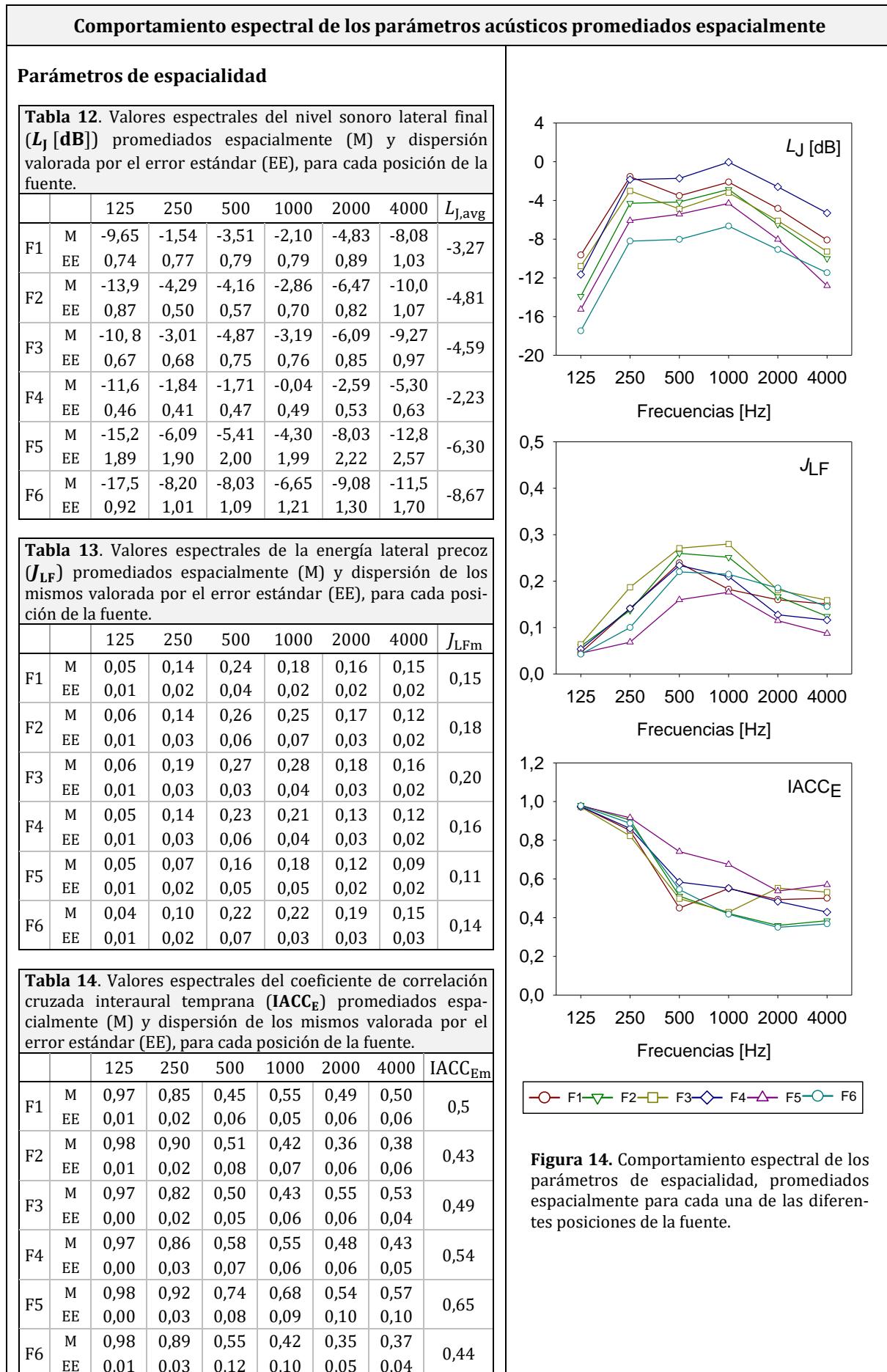
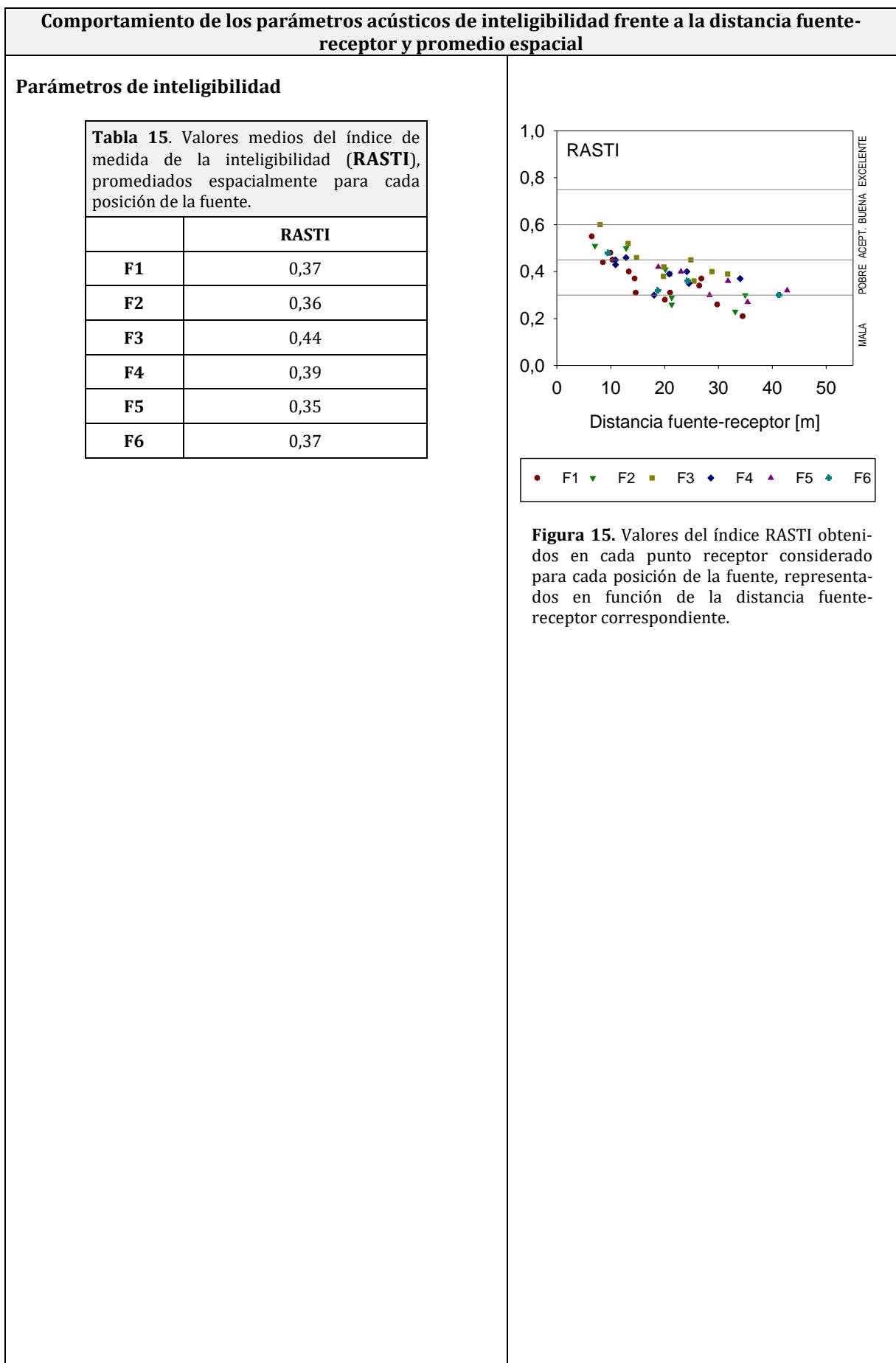


Figura 12. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.



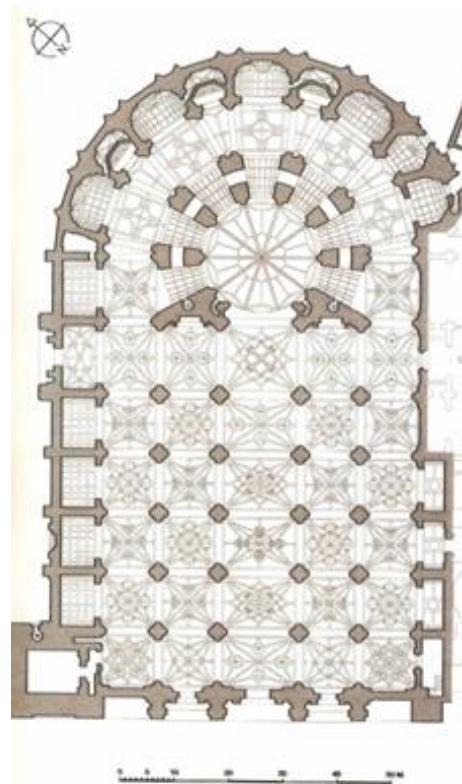




PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*
UACC
 INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA	
Espacio	Catedral de Granada
Ubicación	Calle Gran Vía de Colón, 5, 18001, Granada
Página web oficial	www.catedraldegranada.com
Fechas relevantes	Año de inicio de las obras
Estilo arquitectónico	Renacentista
Arquitectos destacados	Diego de Siloé

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>Igual que en otras ciudades andaluzas, el solar donde se encuentra la catedral estaba ocupado por la antigua Mezquita aljama mayor, que posteriormente fue derruida con el objetivo de levantar este gran templo catedralicio (Fig. 1). El proceso constructivo se alargó durante 181 años, y estuvo dirigido por un amplio número de maestros mayores, entre los que destaca Enrique Egas, arquitecto que elaboró los primeros planos, y Diego de Siloé, quien presentó un proyecto más ambicioso en el que se definía un templo de estilo renacentista con planta basilical y girola poligonal, modelo que se mantuvo hasta la finalización de las obras. Finalizadas la Capilla Mayor y la girola, y habiéndose cerrado las capillas absidales, el edificio fue habilitado provisionalmente como templo metropolitano. Otros maestros que prosiguieron las labores de dirección fueron Juan de Maeda, Miguel Guerrero o Alonso Cano, entre otros.</p> <p>De entre todas las intervenciones llevadas a cabo durante el proceso constructivo, cabe destacar el coro, un espacio que ha ocupado diversos lugares en el interior de la catedral a lo largo de la historia. En su origen, el espacio coral se ubicó en forma de U en la cabecera. Posteriormente, siguiendo el modelo utilizado habitualmente en España, se trasladó al centro de la nave principal. Ya en el siglo XX, el clero catedralicio decide instalar este singular espacio en la Capilla Mayor, ya que consideraban que su anterior ubicación suponía un estorbo para la perspectiva interior.</p> <p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>La catedral de Granada es de estilo principalmente renacentista, aunque la prolongada duración de su construcción ha supuesto la combinación de otros órdenes arquitectónicos. La planta basilical del templo se articula en cinco naves escalonadas en altura, siendo la más alta la nave central (Fig. 2).</p>	

Figura 1. Vistas exteriores.**Figura 2.** Plano de la planta de la catedral.

Descripción del espacio	Fotografías
<p>La capilla Mayor (Fig. 3), ubicada en la cabecera, donde la girola y el ábside son poligonales, está compuesta por una serie de columnas corintias sobre cuyo capitel emergen nuevos pilares con pilastras adosadas que sustentan la gran bóveda de 22,5 metros de diámetro que se alza a 47 metros de altura. El resto de pilares del templo soportan un entramado de bóvedas vaídas profusamente decoradas de forma singular cada una de ellas (Fig. 3). Las capillas laterales se distribuyen por casi todo el perímetro de la iglesia, a excepción de los pies y el crucero (Fig. 2).</p>	 
<p>El coro originariamente estaba localizado en mitad de la nave central (hoy en día diáfana, Fig. 4), entre los dos órganos. Estaba cerrado en su parte posterior por un retablo de mármoles que presidía el antiguo espacio del trascoro. Sin embargo, en el siglo XX se desmontó y gran parte de la sillería coral se trasladó a la Capilla Mayor (Fig. 5). Actualmente, 7 estalos góticos con respaldo renacentistas se localizan a cada uno de los lados del Altar Mayor.</p>	

REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO

- Muros, pilares, bóvedas y cúpulas de piedra, enlucida y pintada (Fig. 3).
- Solería de mármol blanco y negro (Fig. 4).
- Retablos de madera y de mármol.
- Púlpitos de mármol.
- Sillería del Coro de madera (Fig. 5).
- Muros de capillas revestidos de enlucido de yeso con un acabado de pintura
- Bancos de madera. Sillería revestida de terciopelo (presbiterio).
- Portones interiores de madera.

Figura 4. Vista de la nave central.



Figura 5. Estalos de la sillería coral en la capilla Mayor.

Tabla 1. Datos geométricos del espacio.

Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
≈ 158.600 m ³	35 m (47 m cúpula)	106 m	63 m	5	11

Medición acústica						
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS						
Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.						
Se han considerado 3 posiciones de la fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 21 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia (Fig. 6).						
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.						
Normativa aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010					
Fecha	16-17/12/2013					
Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad relat.)	11,7-12,5°C / 36-43%					
Nivel de ocupación	Desocupado					
Nº Posiciones de la fuente	$3 (h_F = 1,50 \text{ m})$					
Nº de receptores	$21 (h_R = 1,20 \text{ m})$					
Señal de excitación	<p><i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 30 s <i>Rango de frecuencias:</i> 63 - 16000 Hz</p>					
Figura 6. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).						
Tabla 3. Resumen de las posiciones de la fuente y los receptores caracterizados.						
Posición de la fuente	F1	F2	F3			
Ubicación de la fuente	Altar mayor	Púlpito	Órgano			
Número total de receptores caracterizados	20	18	12			
Receptores con sonido directo	R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12 R13 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20	R1 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12 R13 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20	R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12 R13 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20	R1' R3' R7 R8 R9 R11 R12 R13 R14 R15 R19 R21		
Receptores sin sonido directo	R19 R20	-	-			

Nota:

La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

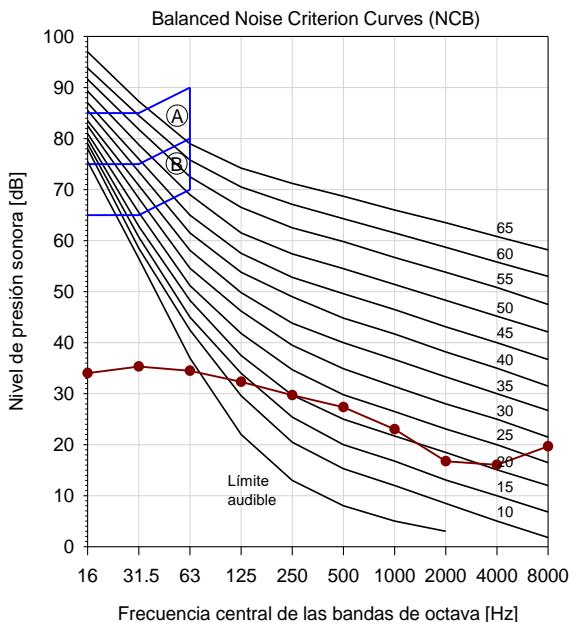
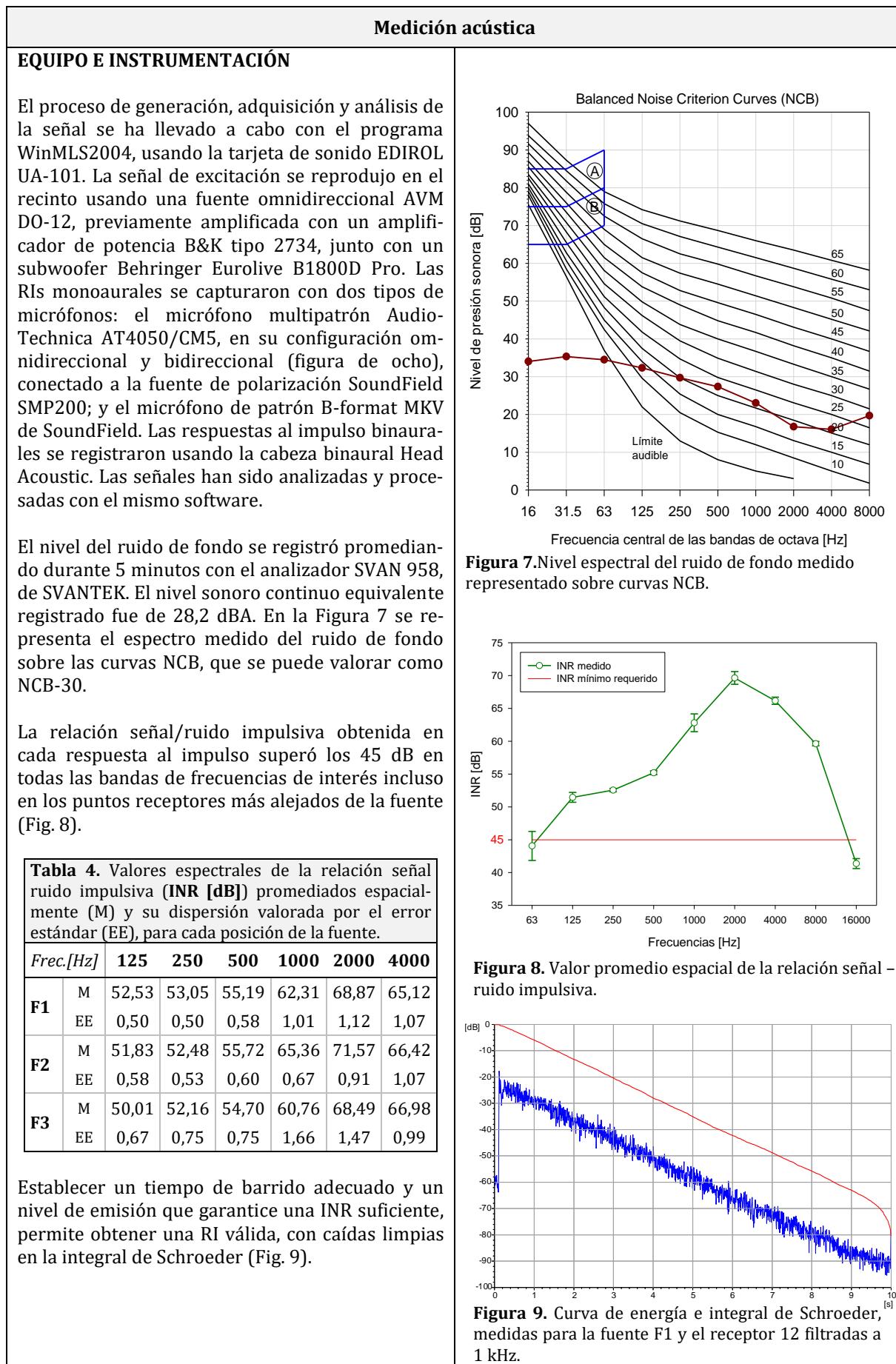


Figura 7. Nivel espectral del ruido de fondo medido representado sobre curvas NCB.

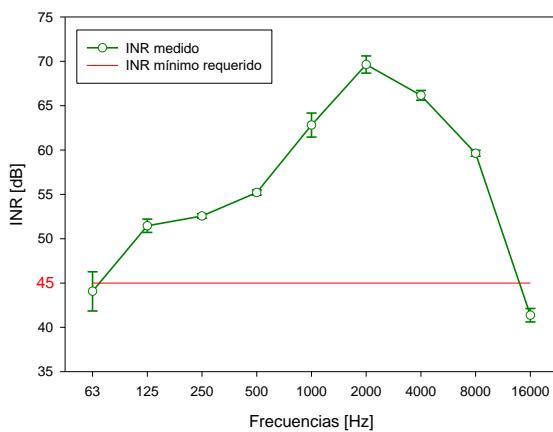


Figura 8. Valor promedio espacial de la relación señal - ruido impulsiva.

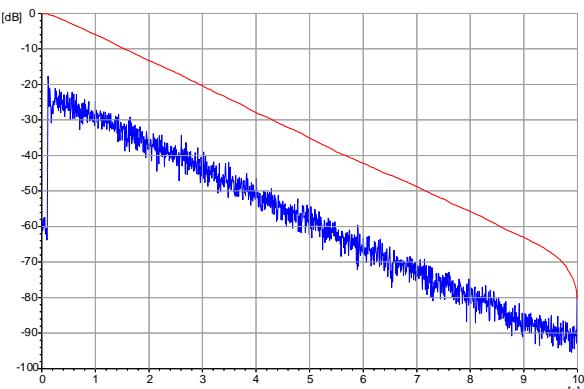


Figura 9. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el receptor 12 filtradas a 1 kHz.

Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas

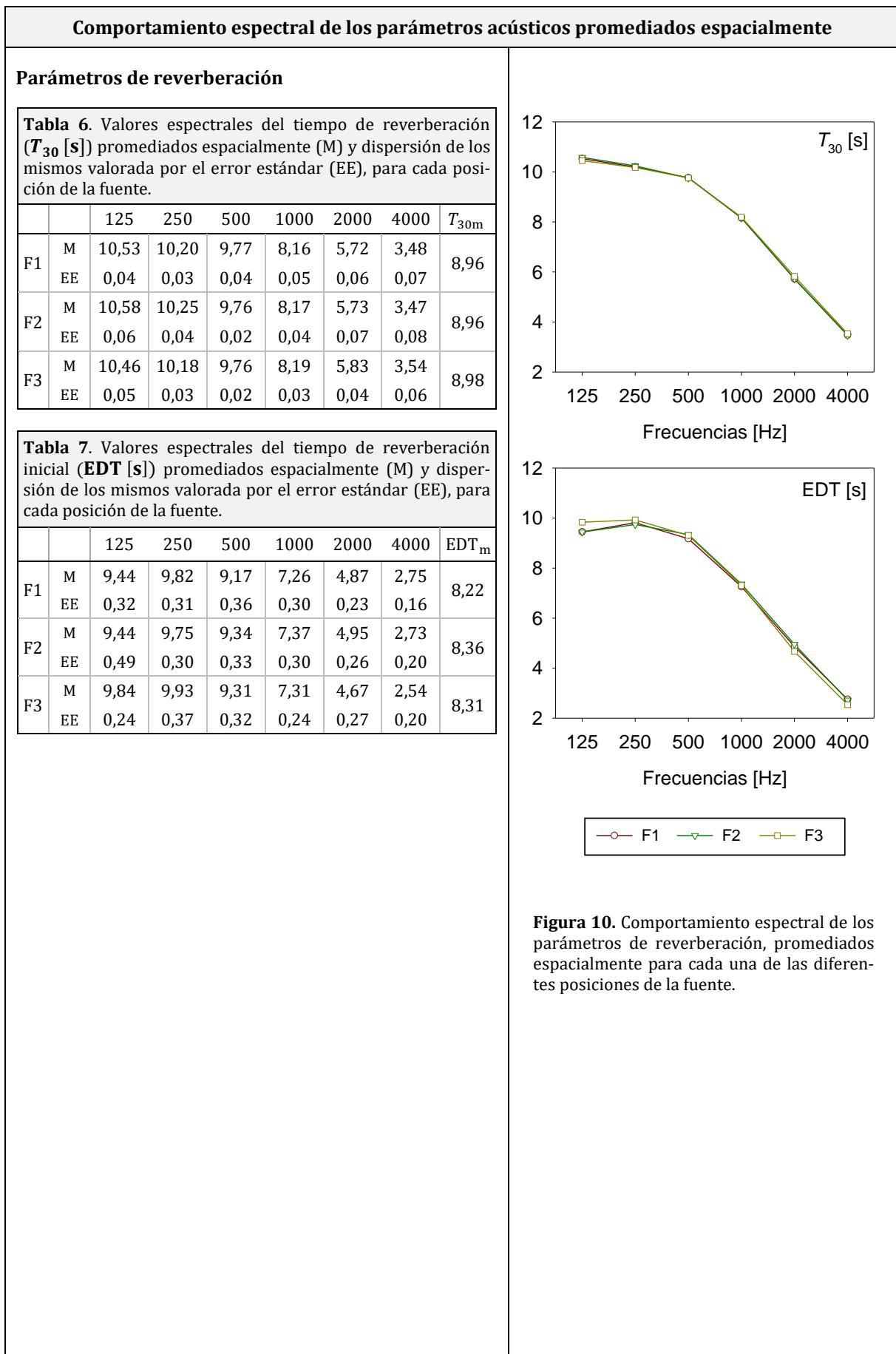


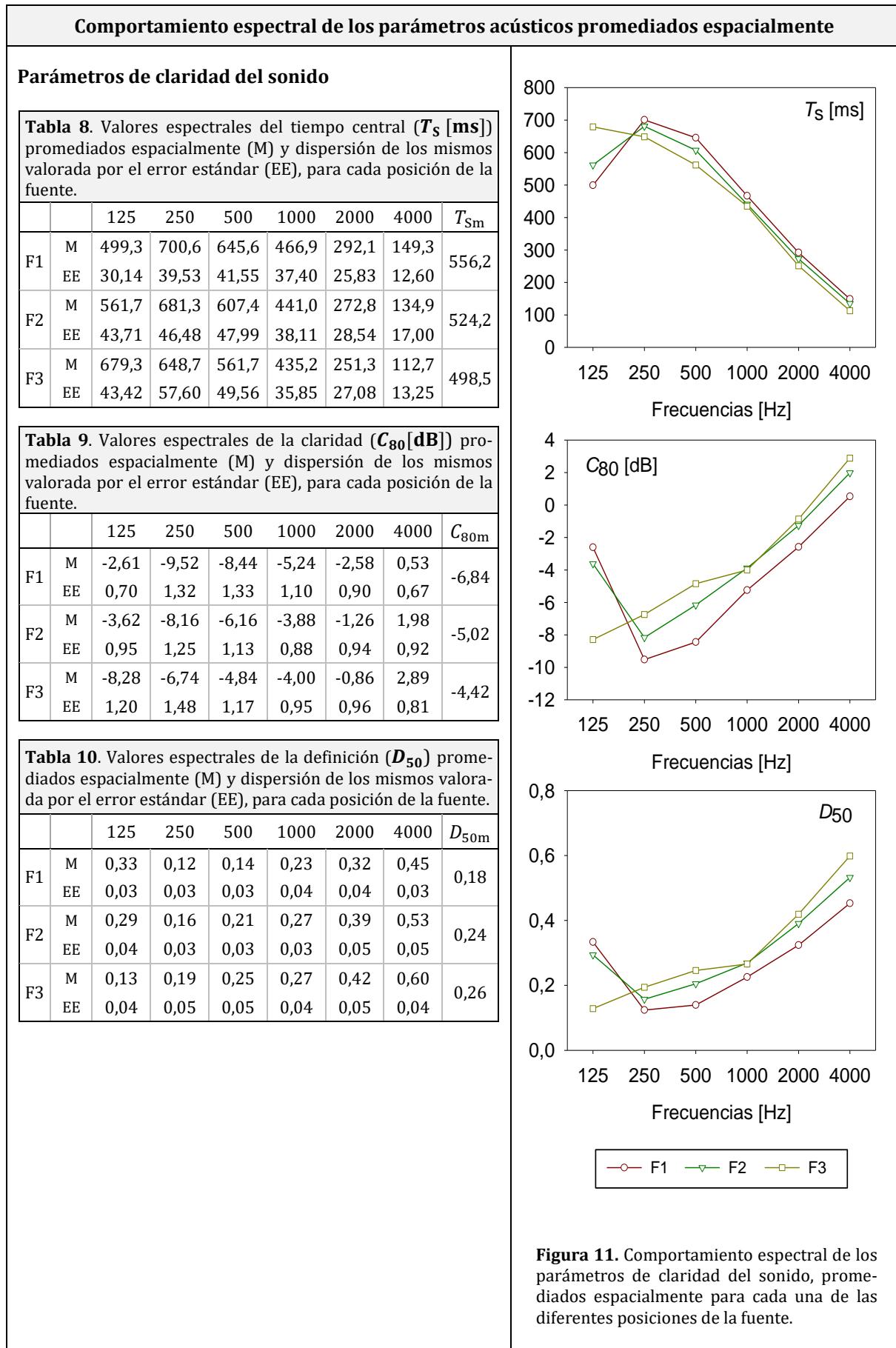
Parámetros acústicos promediados espectralmente			
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente ^a .			
Posición de la fuente	F1	F2	F3
Ubicación de fuente	Altar mayor	Púlpito	Órgano

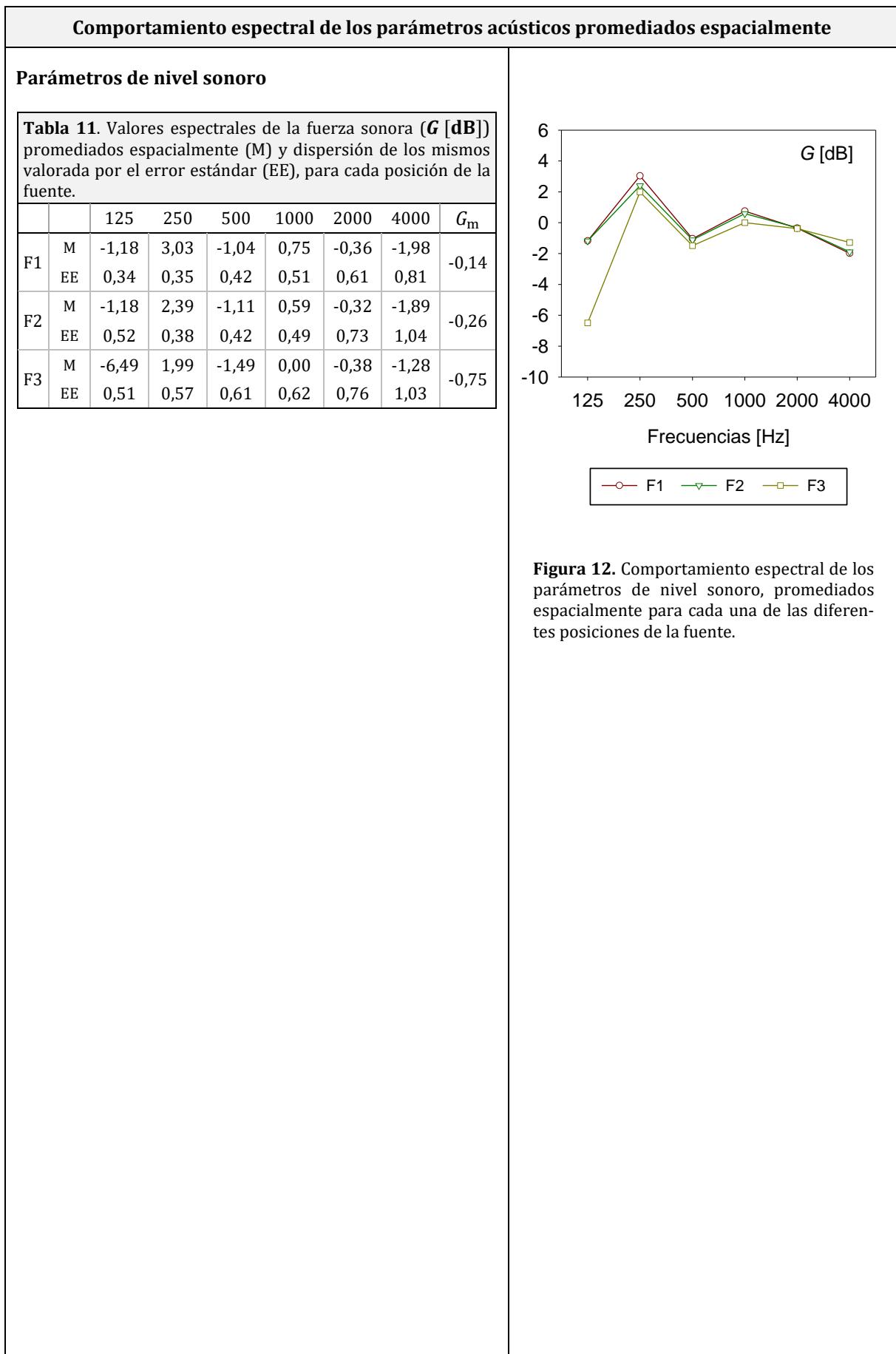
T_{30m} [s]	8,96	8,96	8,98
EDT_m [s]	8,22	8,35	8,31
T_{Sm} [ms]	556,25	524,19	498,46
C_{50m} [dB]	-8,23	-6,05	-5,18
C_{80m} [dB]	-6,84	-5,02	-4,42
D_{50m}	0,18	0,24	0,26
G_m [dB]	-0,14	-0,26	-0,75
$L_{J,avg}$ [dB]	-5,91	-6,40	-7,00
J_{LFm}	0,18	0,20	0,15
BR^b	1,16	1,16	1,15
B_r^b	0,51	0,51	0,52
$IACC_{Em}$	0,45	0,50	0,57
$IACC_{Lm}$	0,10	0,10	0,10
$IACC_{Am}$	0,18	0,23	0,23
$RASTI^b$	0,32	0,36	0,38
STI^b	0,40	0,42	0,43

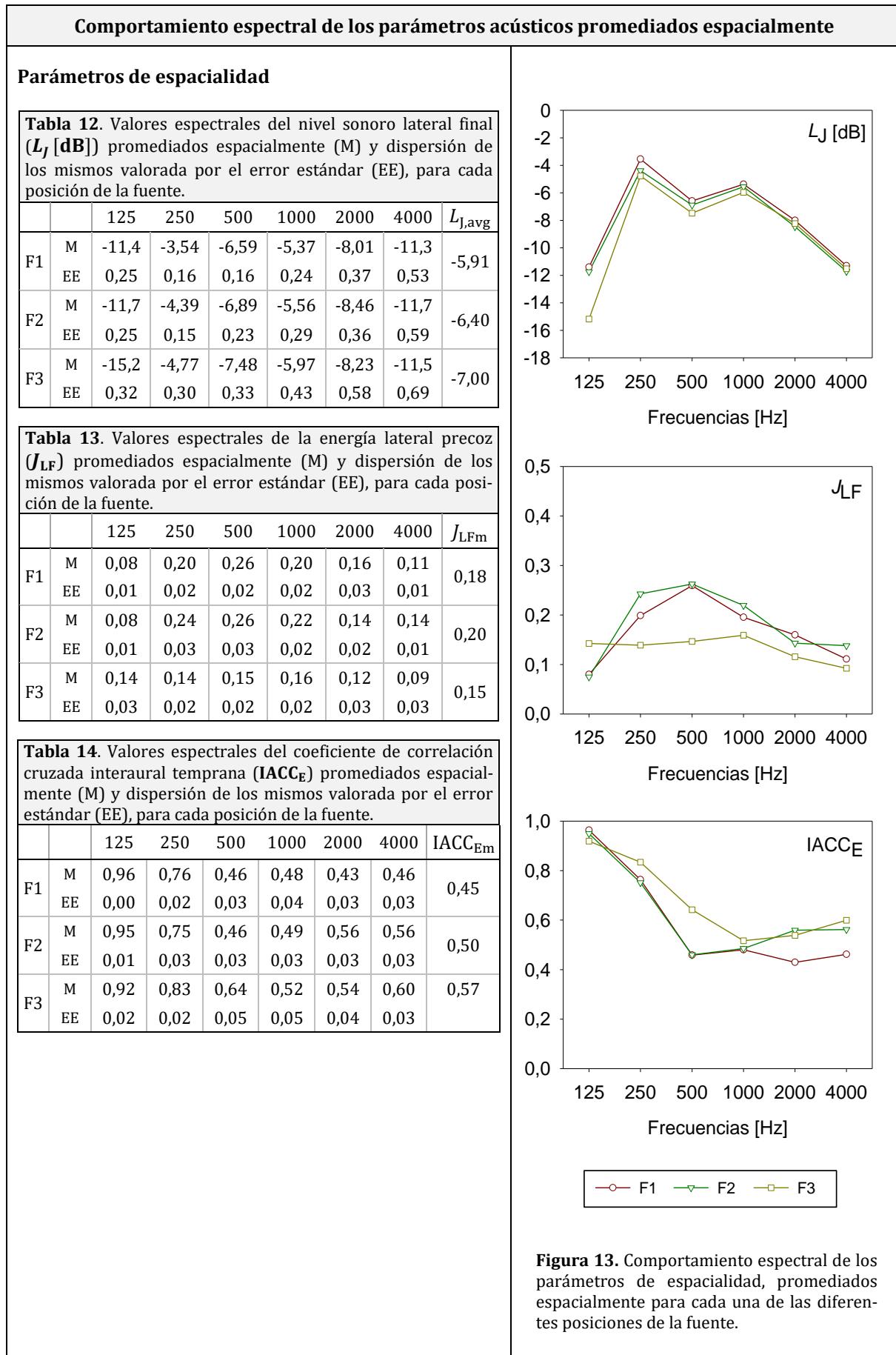
^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

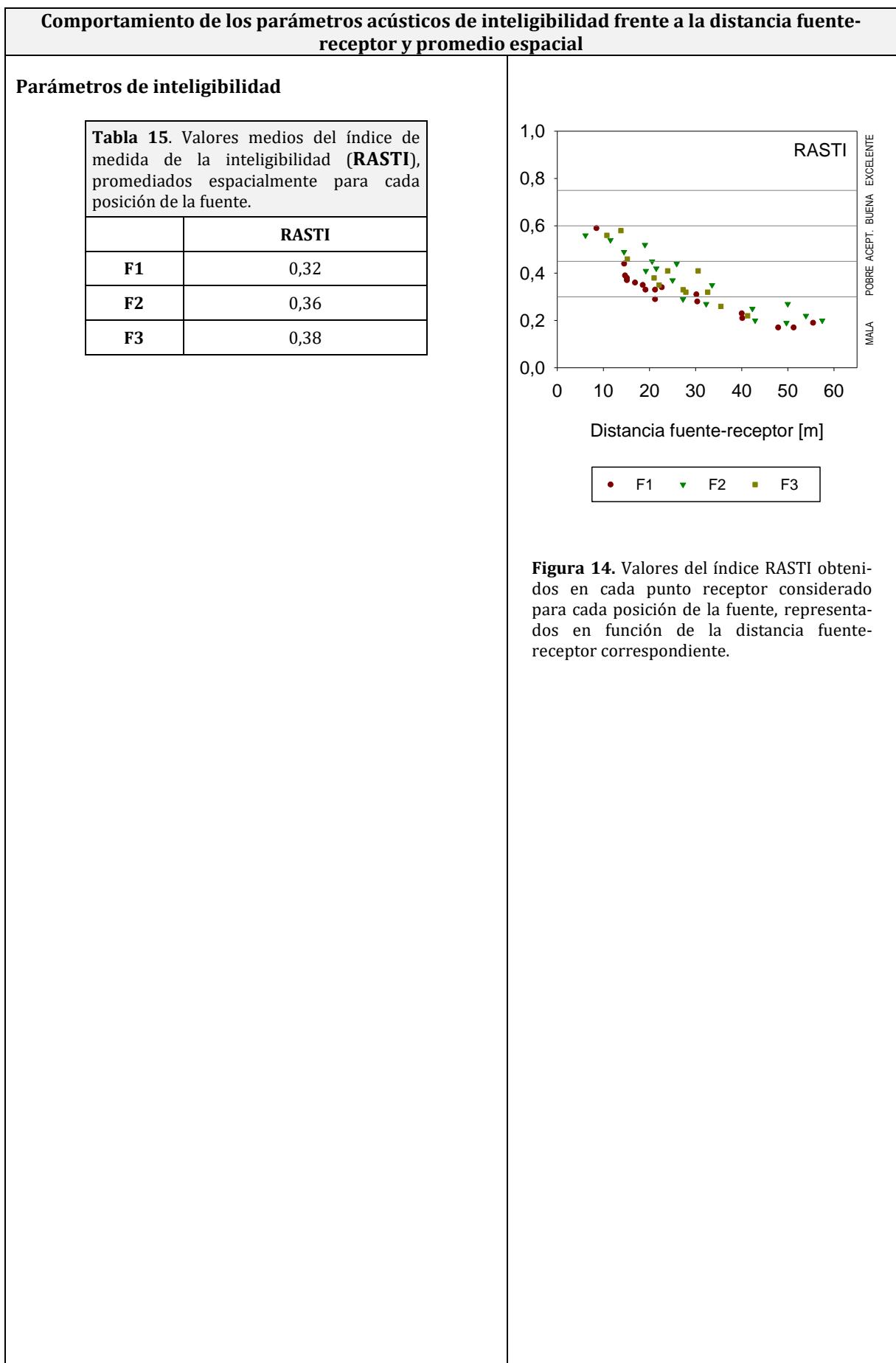
^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.





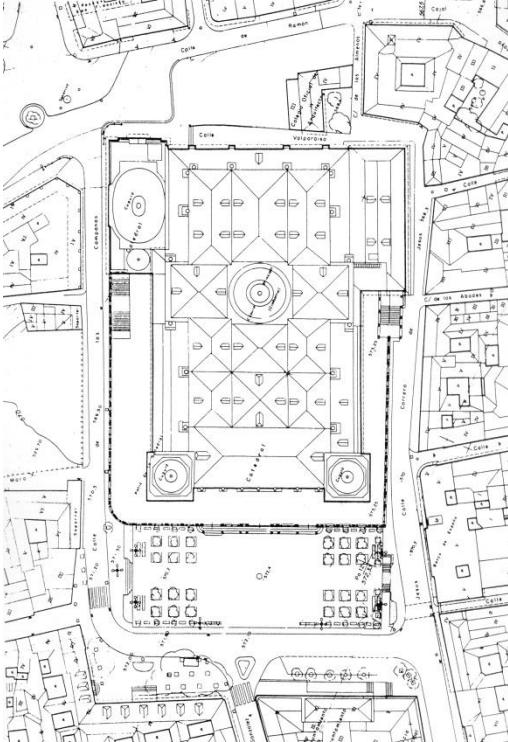






PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*
UACC
 INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN
FICHA TÉCNICA

Espacio	Santa Iglesia Catedral de la Asunción de Jaén	
Ubicación	Plaza de Santa María s/n, 23003. Jaén	
Página web oficial	www.catedraldejaen.org	
Fechas relevantes	Año de construcción	1.249 – 1.724
	Monumento Nacional	Decreto de 3 de junio de 1.931
Estilo arquitectónico	Renacentista-barroco-churrigueresco-neoclásico	
Arquitectos destacados	Pedro de Vandelvira, Andrés de Vandelvira y Alonso Barba	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La Catedral de Jaén, de estilo renacentista, se ubica en la plaza de Santa María de la ciudad andaluza (Fig. 1). La extensa duración del proceso constructivo, así como la intervención de múltiples directores de obras, ha supuesto la coexistencia de diferentes estilos arquitectónicos. Pese a la combinación de diversos estilos, cabe destacar la correcta unidad y consonancia entre los mismos.</p> <p>El solar del templo estaba ocupado en su origen por la Mezquita Mayor de la ciudad musulmana, la cual fue consagrada en 1246 tras la conquista cristiana (Fig. 2). Un incendio producido en 1368 a raíz de la invasión árabe, genera grandes desperfectos y destruye los restos del templo musulmán, por lo que se decide construir una iglesia de nueva planta. Este nuevo templo proyectado en estilo gótico presentaba una cubierta de madera y contaba con cinco naves y un claustro situado hacia el lado norte. La deficiente construcción de este templo angosto y mal iluminado, supone una amenaza de ruina, por lo que se decide demoler la capilla mayor y el crucero con el objetivo de emprender una nueva construcción, un proyecto potenciado principalmente por el derrumbe del cimborrio en 1525.</p> <p>El proceso constructivo de la nueva catedral renacentista, iniciado en el segundo tercio del siglo XVI, se prolongará durante algo más de dos centurias, hasta mediados del siglo XVIII, cuando se llevó a cabo el cerramiento de las bóvedas y capillas de la nave norte.</p> <p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>Una superficie aproximada de 70 metros de ancho por 100 metros de largo delimita el espacio interior del templo. Presenta una planta tipo salón, donde conviven diferentes estilos: renacentista, barroco, churrigueresco y neoclásico.</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior.</p>  <p>Figura 2. Plano de situación de la catedral de Jaén.</p>

Descripción del espacio	Fotografías
<p>La cabecera es rectangular y se estructura en tres naves longitudinales, divididas por pilares cruciformes corintios, coronados por arcos de medio punto que sustentan la techumbre conformada por bóvedas vaídas. En la intersección de la nave central con el crucero se ubica una gran cúpula semiesférica de 12,5 metros de diámetro que alcanza una altura libre de casi 50 metros. A lo largo del perímetro se localizan las capillas laterales, cuyas obras no se concluyeron hasta el siglo XVIII.</p>	
<p>Entre el crucero y la Capilla Mayor se ubica el presbiterio (Fig. 3), un amplio espacio abierto en sus cuatro lados y elevado una altura de cinco peldaños.</p>	
<p>El coro, situado en el centro de la planta (Fig. 4), es uno de los más grandes y más altos de España. Cuenta con un total de 69 sillas en el nivel superior y 53 sillas en el nivel inferior. La sillería es de madera de nogal y fue tallada en el siglo XVI por diferentes artistas. El órgano, ubicado sobre los muros de cantería del espacio coral, fue creado en 1660 y posteriormente reparado en 1705. Su caja, que aún perdura, fue tallada en 1780 en sus dos fachadas. Un nuevo órgano fue realizado en 1790, que posteriormente sería sustituido por el actual, elaborado en 1941.</p>	
<p>En 1733, el maestro mayor José Gallego delineó el alzado del trascoro, una obra para la que se tuvo en cuenta el criterio de José Bada y que se concluye en el año 1791. El conjunto alterna paños anchos y rectos con otros cortos y cóncavos. Se articula en un solo piso con pilastras corintias menos esbeltas que las de las naves (Figs. 4 y 5).</p>	
<h3>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</h3> <ul style="list-style-type: none"> - Muros, bóvedas y cúpulas de piedra. - Solería de mármol blanco y negro. - Pilares y columnas de piedra. - Retablos de madera y de mármol. - Púlpitos de madera y recubrimiento textil. - Sillería del coro de madera. - Bancos de madera. En el coro sillas de madera con acolchado de cuero. - Portones interiores de madera de pino. - Vidrieras. 	

Tabla 1. Datos geométricos del espacio.

Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
≈ 85.100 m ³	31 m (linterna hasta 52 m)	85 m	52 m	3	18

Medición acústica							
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS							
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Se han considerado 5 posiciones de la fuente, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo principal. Se fijaron un total de 26 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia (Fig. 6). Además se ubicó una posición de fuente en la sacristía, junto con 3 posiciones receptoras adicionales.</p>							
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.							
Normativa aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010	Fecha	21-22/04/2013	Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad relat.)	16,5-17°C / 60-70%	Nivel de ocupación	Desocupado
Nº Posiciones de fuente	5 + 1 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)	Nº Total puntos de medida	29 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)	Señal de excitación	<i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 30 s <i>Rango de frecuencias:</i> 63 - 16000 Hz		
<p>Nota: La caracterización acústica de la sacristía, será presentada en una ficha independiente.</p>							
Tabla 3. Resumen de las posiciones de la fuente y los receptores caracterizados.							
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5		
Ubicación de la fuente	Altar mayor	Púlpito	Coro	Órgano	Trascoro		
Número total de receptores caracterizados	21	17	12	11	4		
Receptores con sonido directo	R1 R12 R2 R13 R3 R14 R4 R15 R5 R16 R6 R17 R7 R18 R8 R19 R9 R20 R10 R21 R11	R1 R11 R2 R12 R3 R13 R4 R17 R5 R19 R6 R20 R7 R21 R8 R8 R9 R9 R10 R10	R1 R20 R2 R3 R3 R4 R4 R5 R5 R9 R6 R10 R7 R11 R8 R12 R9 R13 R10 R14 R11 R16	R1 R3 R4 R5 R9 R10 R11 R12 R13 R14 R16	R26 R27 R28 R29		
Receptores sin sonido directo	-	-	-	-	-		
<p>Nota: La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.</p>							
Análisis acústico experimental				III	CATEDRAL DE JAÉN		

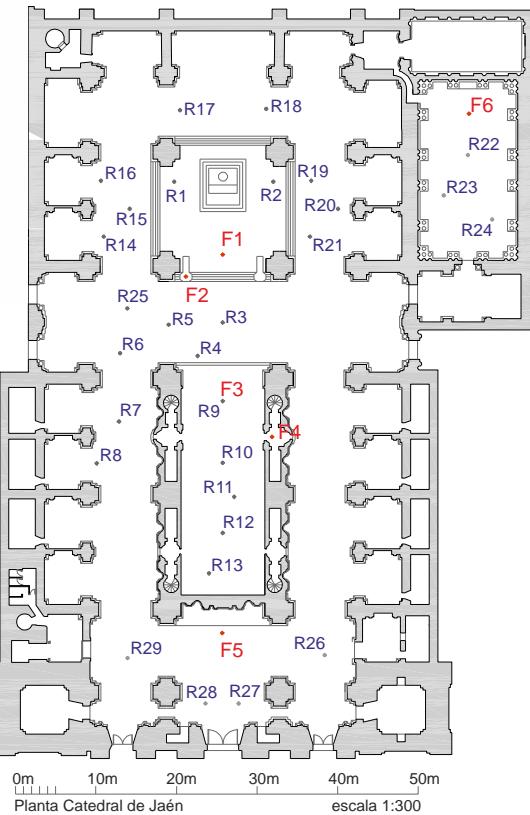


Figura 6. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).

Medición acústica																																																					
EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN																																																					
<p>El proceso de generación y adquisición de la señal se ha llevado a cabo con el programa WinMLS2004, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101 de 8 canales.</p> <p>La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro. Las RIs monoaurales se capturaron con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización SoundField SMP200; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza binaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p> <p>El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 28,97 dBA. La Figura 7 representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NCB, que se puede valorar como NCB-30.</p> <p>La relación señal/ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (ver Fig. 8). Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder (Fig. 9).</p>																																																					
<p>Tabla 4. Valores espectrales de la relación señal ruido impulsiva (INR [dB]) promediados espacialmente (M) y su dispersión valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frec.[Hz]</th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F1</td> <td>M EE</td> <td>58,95 0,40</td> <td>58,47 0,35</td> <td>62,43 0,30</td> <td>67,43 0,43</td> <td>71,28 0,58</td> <td>66,95 0,60</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>M EE</td> <td>59,66 0,55</td> <td>58,65 0,50</td> <td>63,05 0,47</td> <td>69,69 0,47</td> <td>71,89 0,53</td> <td>66,61 0,71</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>M EE</td> <td>60,39 0,93</td> <td>60,14 0,65</td> <td>63,94 0,70</td> <td>70,28 0,67</td> <td>72,91 0,81</td> <td>67,57 1,12</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>M EE</td> <td>56,68 0,47</td> <td>58,40 0,55</td> <td>61,06 0,44</td> <td>62,98 0,84</td> <td>67,57 0,81</td> <td>63,62 1,07</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>M EE</td> <td>63,88 0,52</td> <td>62,38 0,81</td> <td>65,88 0,51</td> <td>69,10 0,54</td> <td>71,10 0,83</td> <td>64,43 0,66</td> </tr> </tbody> </table>							Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	F1	M EE	58,95 0,40	58,47 0,35	62,43 0,30	67,43 0,43	71,28 0,58	66,95 0,60	F2	M EE	59,66 0,55	58,65 0,50	63,05 0,47	69,69 0,47	71,89 0,53	66,61 0,71	F3	M EE	60,39 0,93	60,14 0,65	63,94 0,70	70,28 0,67	72,91 0,81	67,57 1,12	F4	M EE	56,68 0,47	58,40 0,55	61,06 0,44	62,98 0,84	67,57 0,81	63,62 1,07	F5	M EE	63,88 0,52	62,38 0,81	65,88 0,51	69,10 0,54	71,10 0,83	64,43 0,66
Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000																																															
F1	M EE	58,95 0,40	58,47 0,35	62,43 0,30	67,43 0,43	71,28 0,58	66,95 0,60																																														
F2	M EE	59,66 0,55	58,65 0,50	63,05 0,47	69,69 0,47	71,89 0,53	66,61 0,71																																														
F3	M EE	60,39 0,93	60,14 0,65	63,94 0,70	70,28 0,67	72,91 0,81	67,57 1,12																																														
F4	M EE	56,68 0,47	58,40 0,55	61,06 0,44	62,98 0,84	67,57 0,81	63,62 1,07																																														
F5	M EE	63,88 0,52	62,38 0,81	65,88 0,51	69,10 0,54	71,10 0,83	64,43 0,66																																														
<p>Figura 7. Nivel espectral del ruido de fondo medido representado sobre las curvas NCB.</p>																																																					
<p>Figura 8. Valor promedio espacial de la relación señal/ruido impulsiva y dispersión valorada por el error estándar.</p>																																																					
<p>Figura 9. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para F1 y R03 filtradas a 1 kHz.</p>																																																					

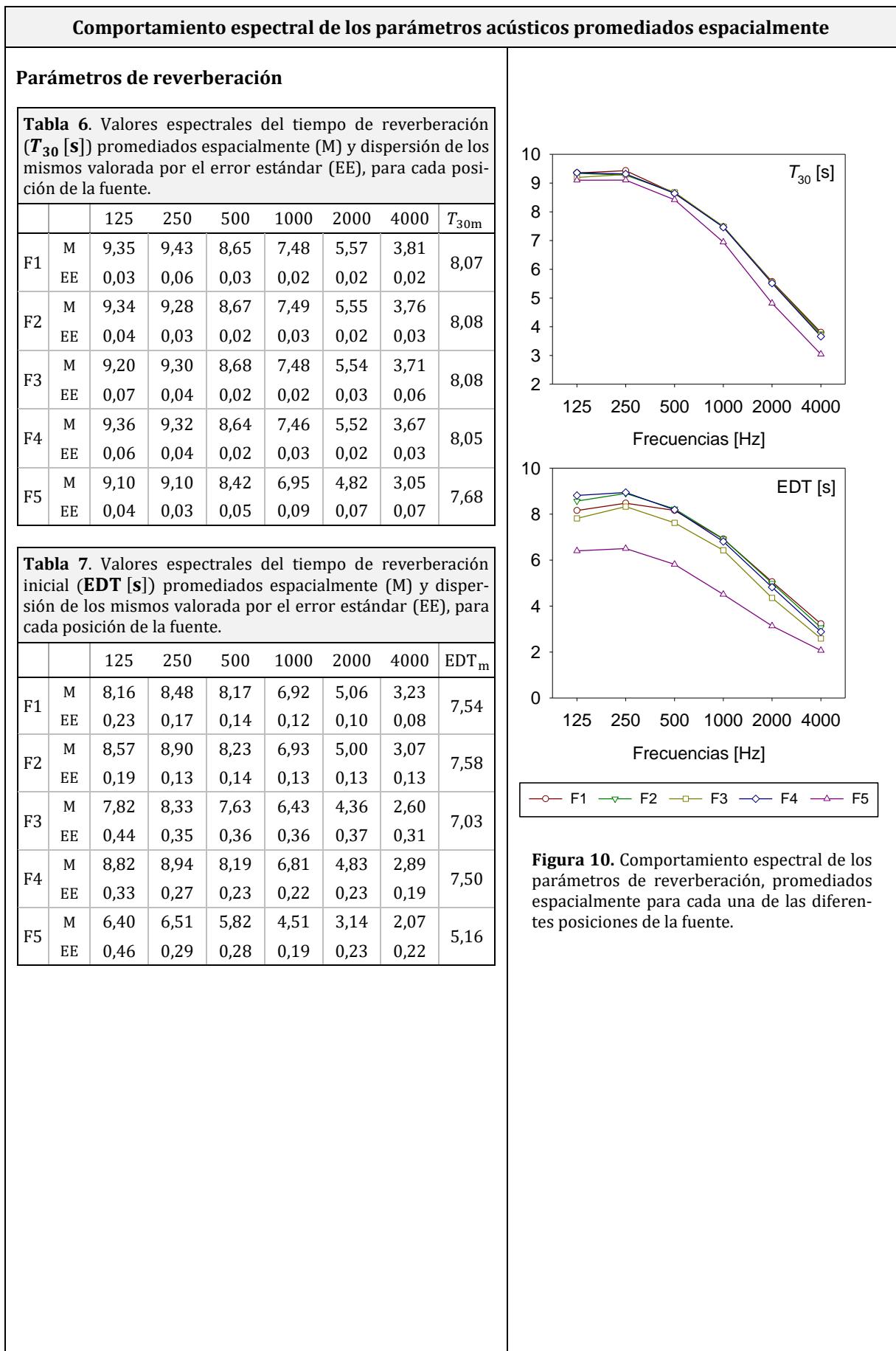
Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas



Parámetros acústicos promediados espectralmente					
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente^a.					
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5
Ubicación de fuente	Altar mayor	Púlpito	Coro	Órgano	Trascoro
T_{30m} [s]	8,07	8,08	8,08	8,05	7,68
EDT_m [s]	7,54	7,58	7,03	7,50	5,16
T_{Sm} [ms]	511,93	473,00	448,71	476,82	298,63
C_{50m} [dB]	-8,34	-6,07	-7,33	-6,85	-3,25
C_{80m} [dB]	-7,04	-5,07	-5,43	-5,59	-2,10
D_{50m}	0,16	0,23	0,24	0,20	0,32
G_m [dB]	2,18	1,94	3,34	2,21	-1,05
$L_{J,avg}$ [dB]	-3,56	-4,04	-3,99	-2,99	-7,72
J_{LFm}	0,17	0,17	0,16	0,19	0,18
BR^b	1,16	1,15	1,14	1,16	1,18
B_r^b	0,58	0,58	0,57	0,57	0,51
$IACC_{Em}$	0,46	0,47	0,40	0,43	0,46
$IACC_{Lm}$	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10
$IACC_{Am}$	0,19	0,20	0,21	0,16	0,26
$RASTI^b$	0,31	0,34	0,37	0,34	0,44
STI^b	0,37	0,40	0,42	0,37	0,48

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.



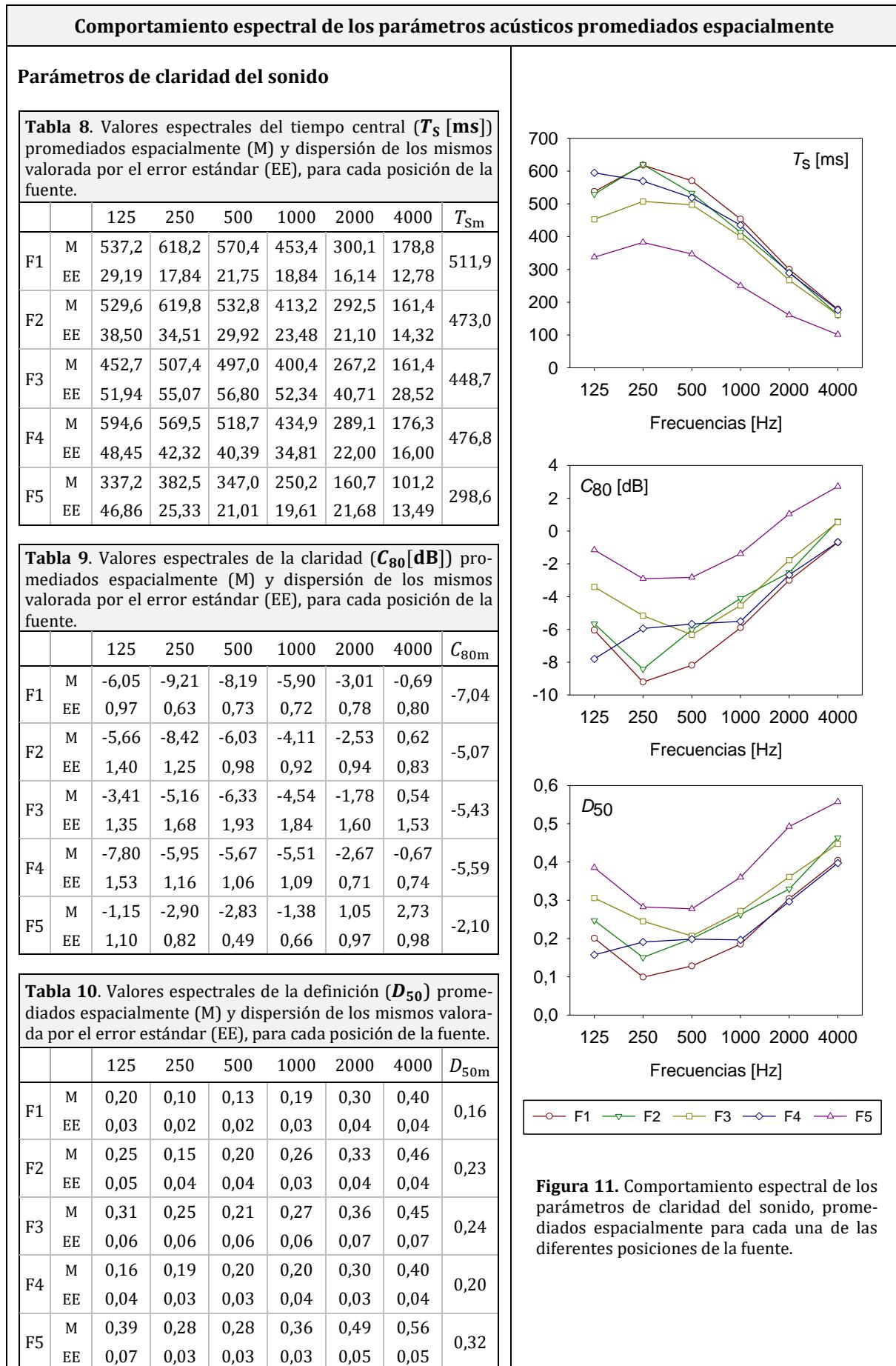
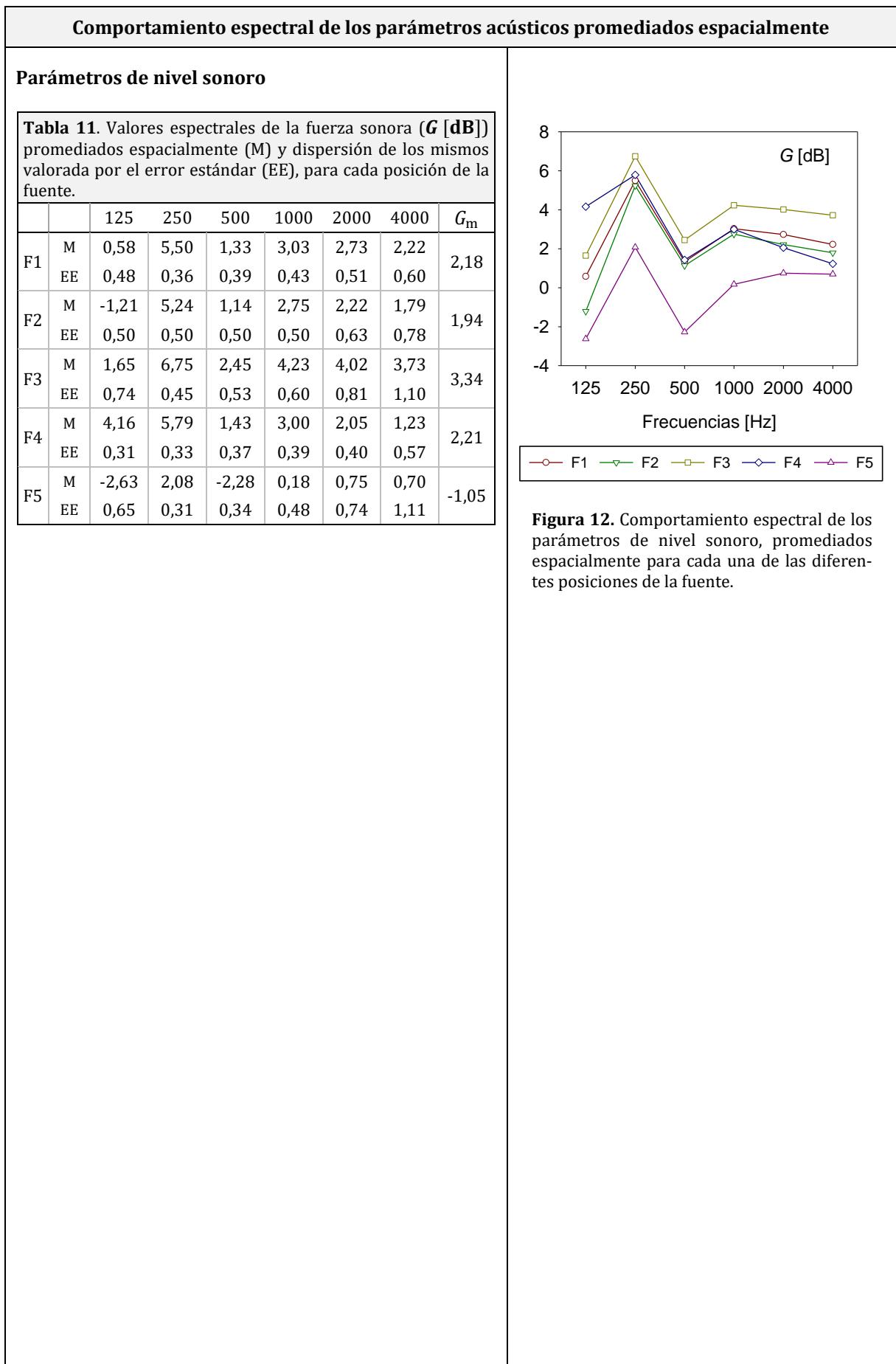


Figura 11. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.



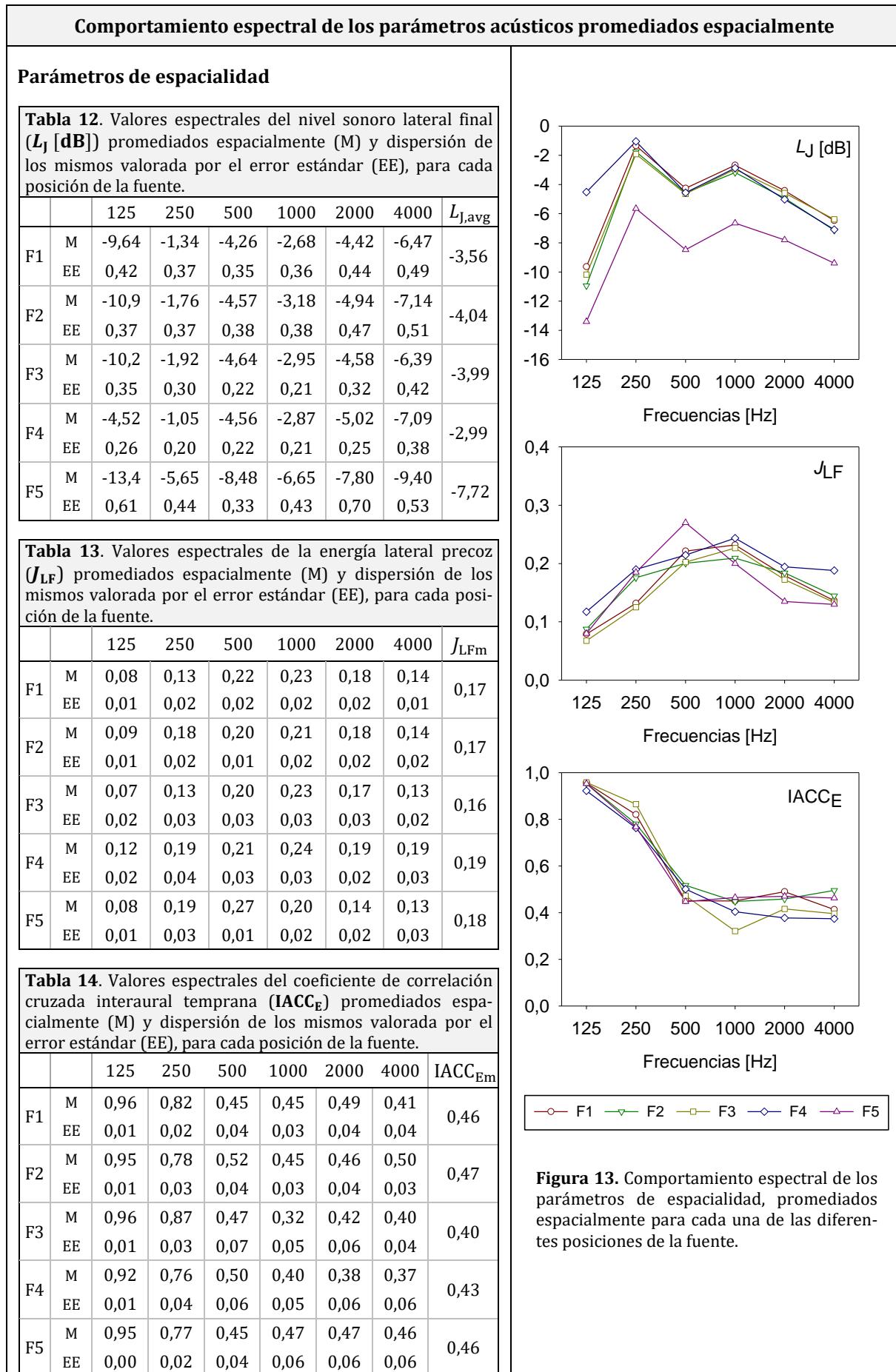
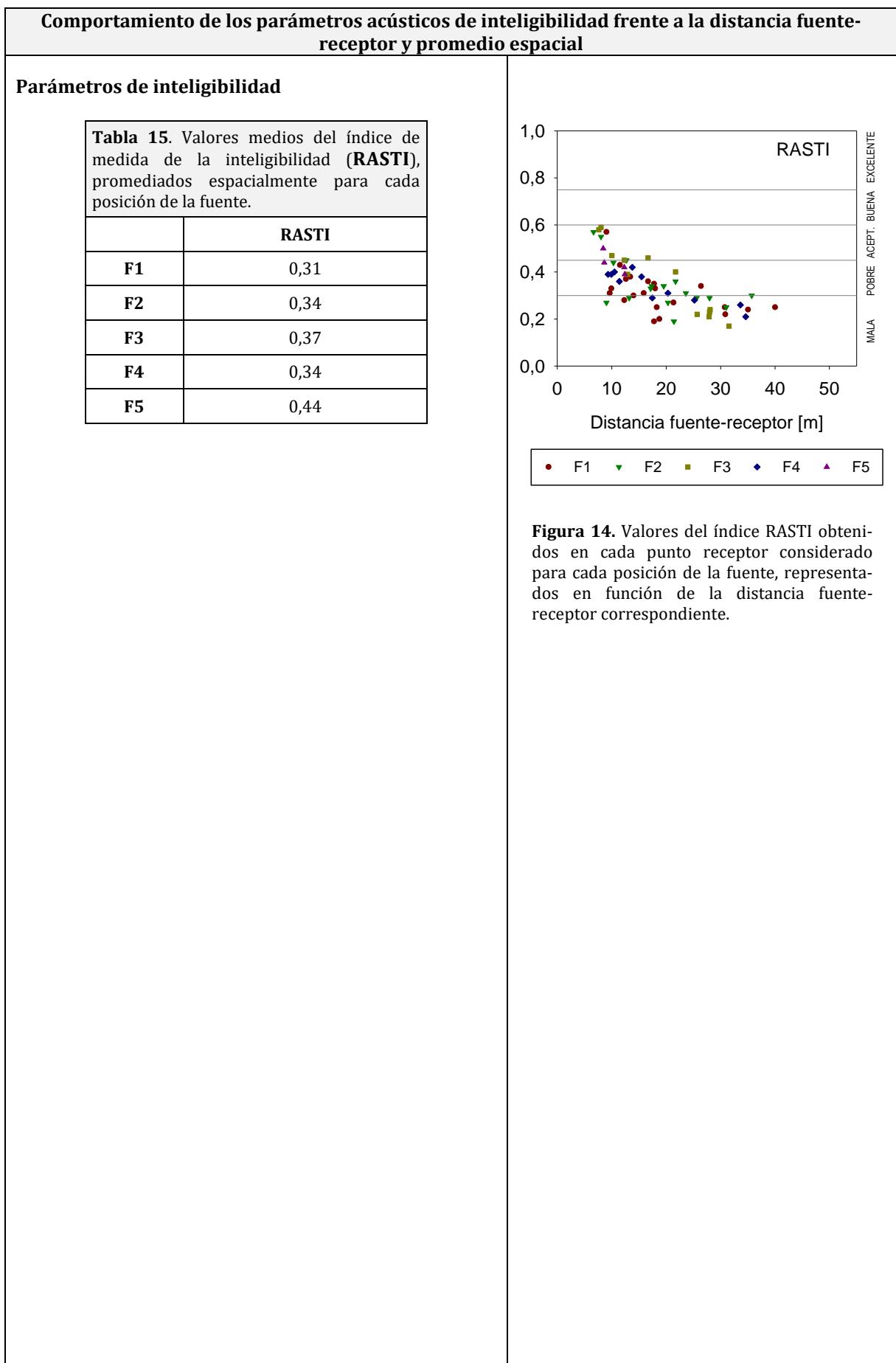
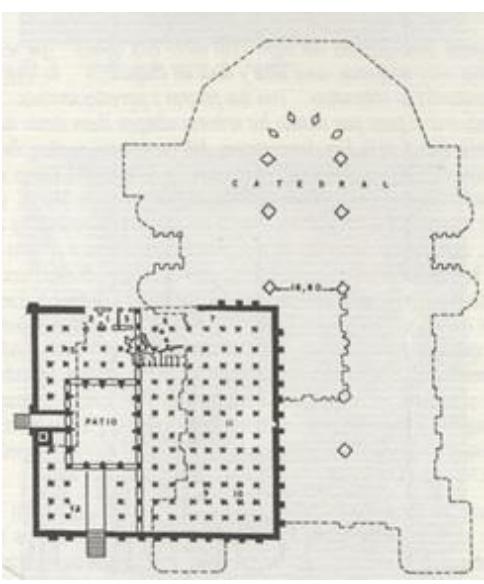


Figura 13. Comportamiento espectral de los parámetros de espacialidad, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.



PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*
UACC
 INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

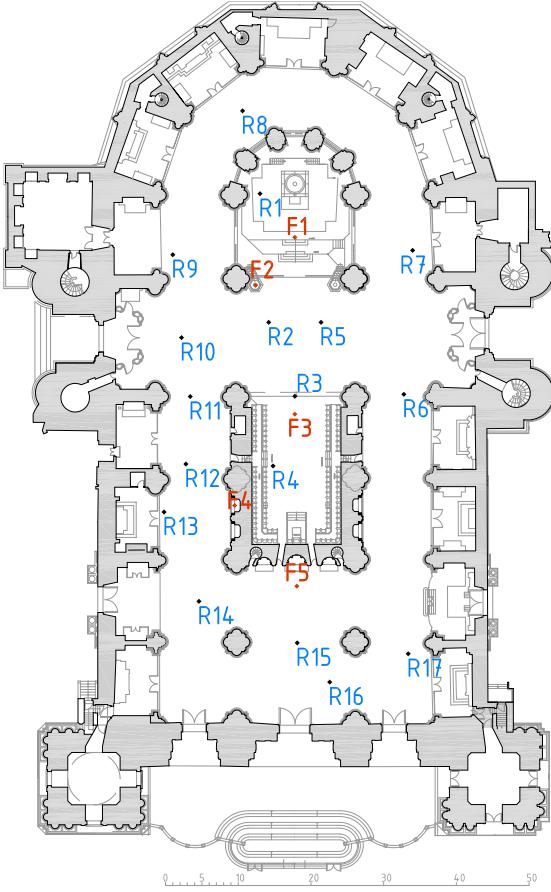
FICHA TÉCNICA		
Espacio	Santa Iglesia Catedral Basílica de la Encarnación, "La Manquita"	
Ubicación	Calle Molina Lario, 9, 29015, Málaga	
Página web oficial	-	
Fechas relevantes	Años de construcción	1528 - 1782
	Declarado Monumento Histórico Artístico	Junio de 1931
Estilo arquitectónico	Renacentista	
Arquitectos destacados	Diego de Siloé y Andrés de Vandelvira	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La catedral de la Encarnación de Málaga, considerada el edificio más emblemático de toda la ciudad, está situada en el centro histórico (Fig. 1). Una primitiva mezquita aljama se localizaba en el mismo solar (Fig. 2) en el momento de la reconquista de los Reyes Católicos. Sus majestades ordenaron derribar aquel edificio con el fin de erigir el templo cristiano.</p> <p>Entre 1528, año en el que se inician las obras, y finales del siglo XVIII, se desarrolla el largo proceso constructivo en que se ve envuelto, el cual se interrumpió en numerosas ocasiones. Concretamente fue en 1782 cuando se pone fin a todo este arduo proyecto, dejando a medio acabar la torre sur de la fachada principal, por lo que hoy día se considera como una obra inacabada, y por lo que se la conoce popularmente como "La Manquita". La construcción estuvo dirigida por algunos de los grandes maestros de la época, entre los que se encuentran Pedro López, Hernán Ruiz II y Diego de Vergara.</p> <p>Las diferentes modificaciones e intervenciones llevadas a cabo por diferentes maestros, suponen la existencia de una síntesis de estilos arquitectónicos entre los que predomina el renacentista en el interior y el barroco en la fachada.</p> <p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>La planta basilical rectangular del templo, se articula en tres naves, siendo la central más ancha y más alta que las laterales.</p> <p>Todo el templo está sustentado por pilares a los que se adosan semicolumnas corintias, sobre los cuales emergen nuevos pilares con pilastras adosadas, que soportan un entramado de bóvedas vaídas profusamente decoradas que se alza a 42 metros de altura (Fig. 3).</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior.</p>  <p>Figura 2. Planta de la mezquita Aljama Almohade sobre planta actual de la catedral.</p>

Descripción del espacio	Fotografías
<p>La luz penetra en el interior a través de las numerosas vidrieras ubicadas a la altura del segundo cuerpo.</p> <p>En la cabecera, donde la girola y el ábside son poligonales, se localiza la Capilla Mayor (Fig. 4), la cual está rodeada de muros sesgados por altas ventanas, se cubre con una gran bóveda nervada. Las capillas laterales se distribuyen por casi todo el perímetro de la iglesia, a excepción de los pies y el crucero.</p>	
<p>En la nave central se sitúa una de las estancias más valiosas del templo, el coro (Fig. 5). Posee una sillería de madera considerada como cumbre de la carpintería barroca, tallada por el prestigioso escultor Pedro de Mena. Están flanqueado por dos grandes órganos obra de Julián de la Orden. Las cajas de los mismos, talladas por José Martín de Aldehuela, constan de tres cuerpos cada una (Fig. 4).</p>	
<p>El trascoro está presidido por un altar donde reposa una escultura de mármol de la Piedad.</p> <p>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros, bóvedas y cúpulas de piedra (Fig. 3). - Solería de mármol blanco y jaspe encarnado. En el presbiterio se localiza un entarimado de madera y alfombrado en algunas zonas. - Pilares de piedra caliza en la parte inferior y de mármol en la parte superior. - Retablos de madera y de mármol. - Púlpitos de mármol. - Sillería del coro de madera (Fig. 5). - Muros de capillas revestidos de enlucido de yeso con un acabado de pintura que simula el trazado de los sillares. - Bancos de madera y revestidos de tela (coro). Sillería de plástico y revestida de terciopelo (presbiterio). - Portones interiores de madera de pino. 	

Tabla 1. Datos geométricos del espacio.

Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
$\approx 118.500 \text{ m}^3$	42 m	98 m	52 m	3	15

Medición acústica												
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS												
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.</p> <p>Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 20 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (Fig. 6).</p>												
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.												
Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010											
Fecha	11-12/10/2011											
Condiciones ambientales (Temperatura/Humedad rel.)	25°C / 45-55%											
Nivel de ocupación	Desocupado											
Nº posiciones de fuente	5 ($h_F = 1,50 \text{ m}$)											
Nº de receptores	17 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)											
Señal de excitación	<p><i>Tipo:</i> Barido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 30 s <i>Rango de frecuencias:</i> 63 – 16000 Hz</p>											
												
Figura 6. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y los puntos receptores (R).												
Tabla 3. Resumen de posiciones de fuente y receptores caracterizados.												
Posición de la fuente	F1		F2		F3							
Ubicación de la fuente	Altar Mayor		Púlpito		Coro							
Número total de receptores caracterizados	15		11		8							
Receptores con sonido directo	R1 R2 R3 R4 R5 R6	R7 R8 R9 R11 R12 R13	R1 R2 R3 R4 R5 R6	R7 R10 R11 R12 R13 R14	R10 R11 R12 R13 R14 R15 R16 R17	R4 R7 R12 R13 R14 R14 R15 R16 R17						
Receptores sin sonido directo	R10 R14 R15	-	R11	R2 R10 R11	R13							
<p>Nota: La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto</p>												

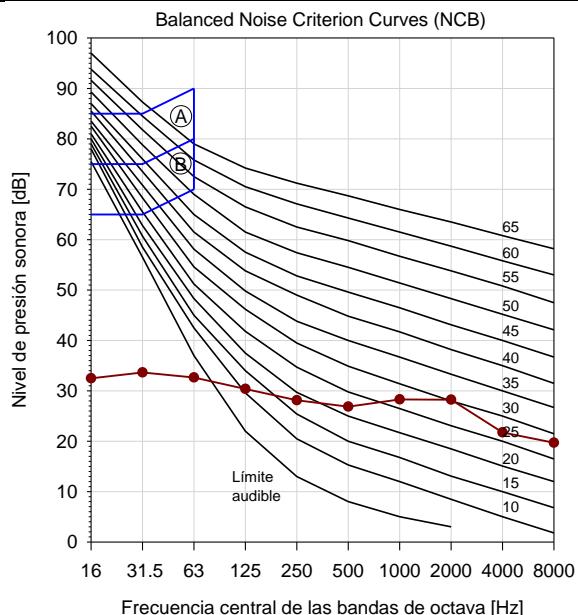
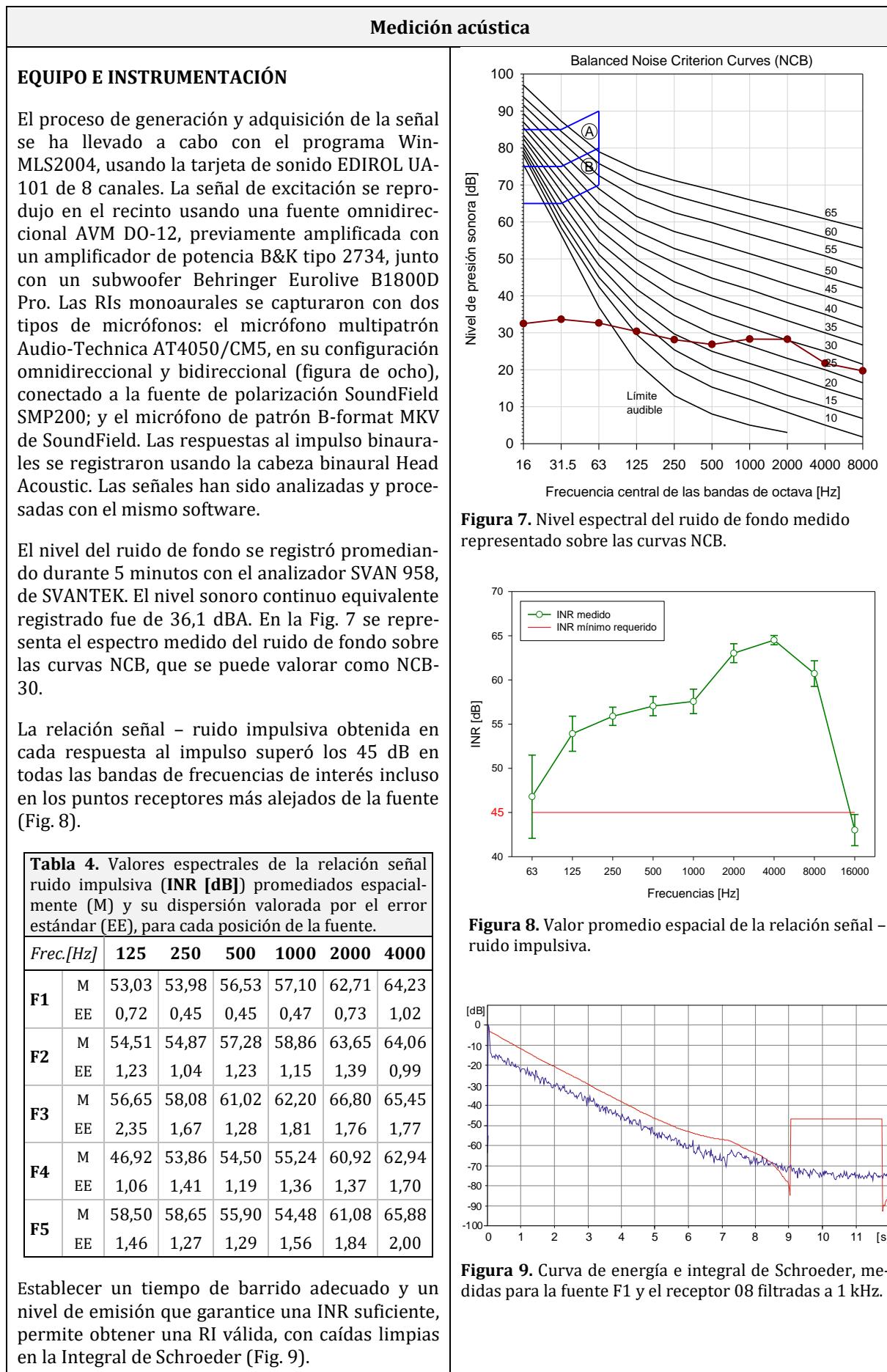


Figura 7. Nivel espectral del ruido de fondo medido representado sobre las curvas NCB.

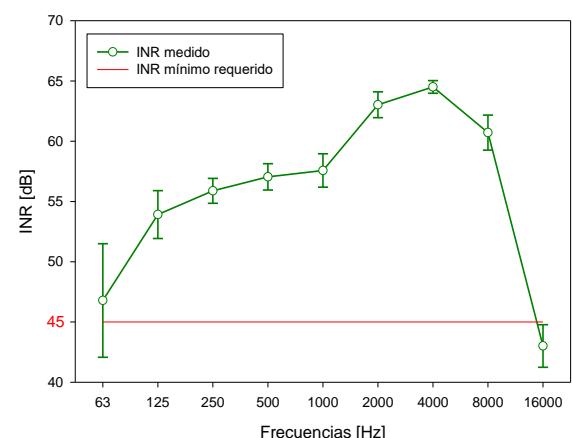


Figura 8. Valor promedio espacial de la relación señal – ruido impulsiva.

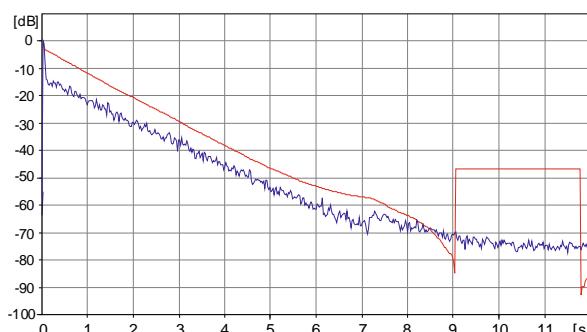
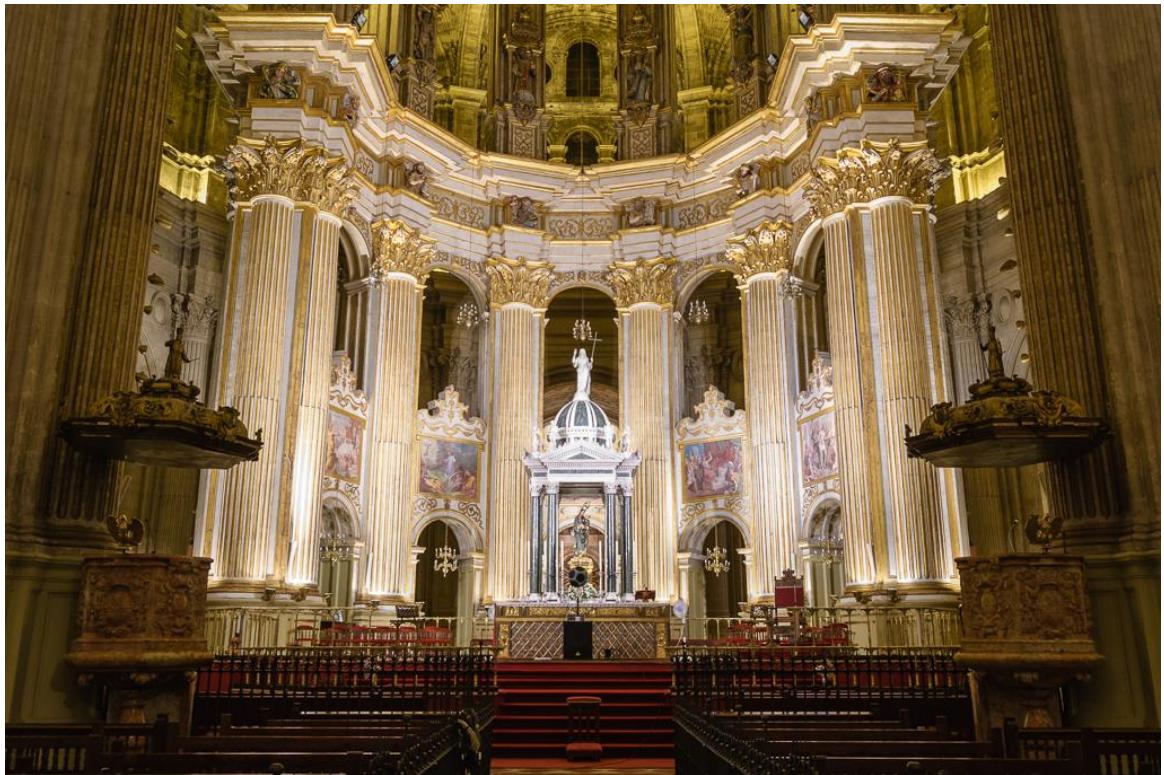


Figura 9. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el receptor 08 filtradas a 1 kHz.

Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas

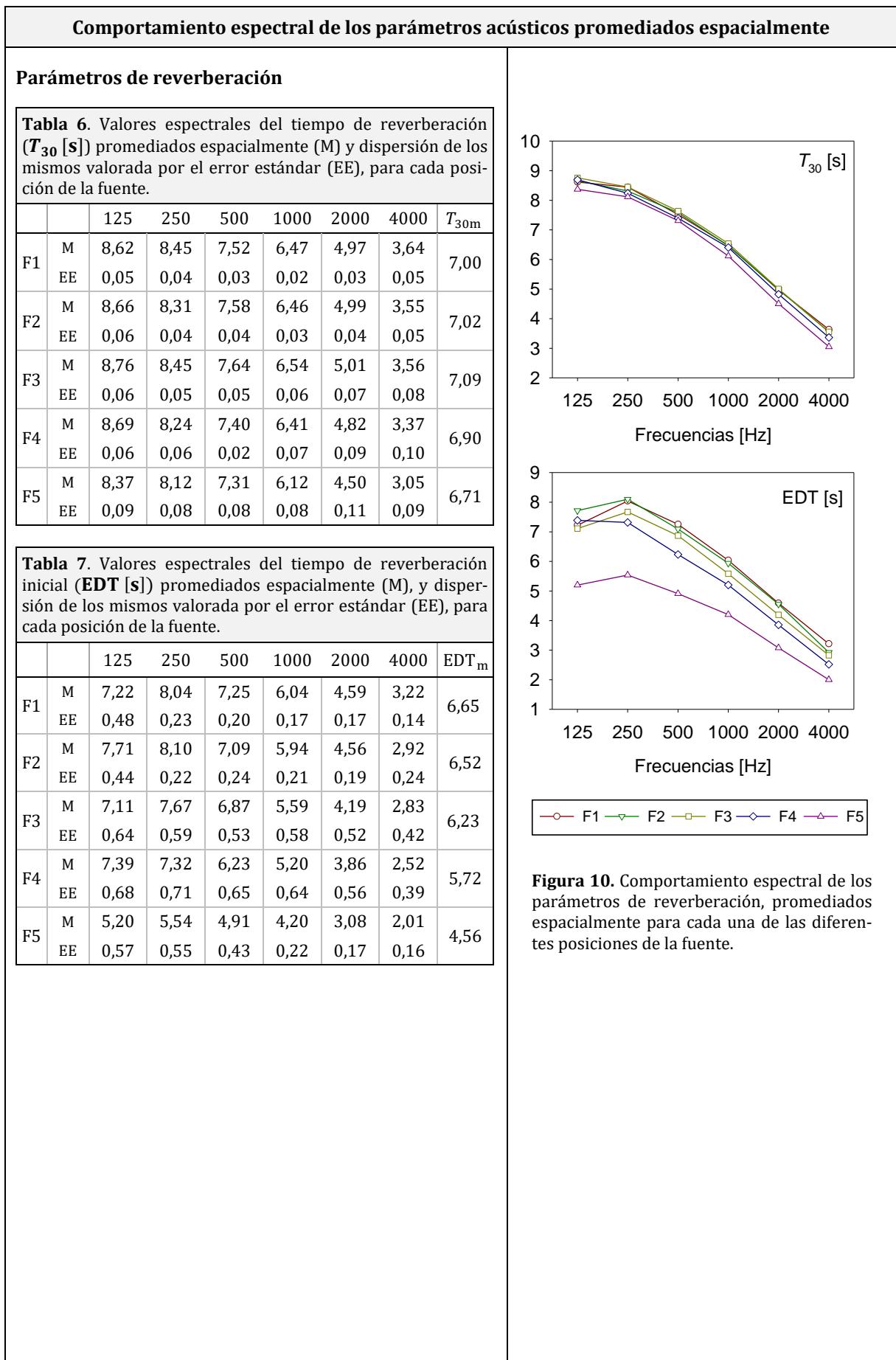


Parámetros acústicos promediados espectralmente					
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente ^a .					
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5
Ubicación de fuente	Altar mayor	Púlpito	Coro	Órgano	Trascoro

T_{30m} [s]	7,00	7,02	7,09	6,96	6,71
EDT_m [s]	6,65	6,52	6,23	5,72	4,56
T_{Sm} [ms]	439,75	372,14	418,58	352,70	261,50
C_{50m} [dB]	-7,52	-3,72	-6,69	-5,00	-3,01
C_{80m} [dB]	-6,20	-2,68	-5,20	-3,23	-1,64
D_{50m}	0,19	0,33	0,23	0,27	0,34
G_m [dB]	0,09	2,68	2,40	0,45	5,81
$L_{J,avg}$ [dB]	-6,20	-5,06	-5,84	-4,36	-1,00
J_{LFm}	0,19	0,17	0,19	0,17	0,24
BR^b	1,22	1,21	1,21	1,23	1,23
B_r^b	0,62	0,61	0,60	0,59	0,56
$IACC_{Em}$	0,50	0,50	0,44	0,46	0,52
$IACC_{Lm}$	0,11	0,11	0,09	0,11	0,12
$IACC_{Am}$	0,23	0,25	0,15	0,19	0,29
$RASTI^b$	0,31	0,41	0,35	0,37	0,46
STI^b	0,38	0,45	0,41	0,40	0,49

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Los índices RASTI y STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.



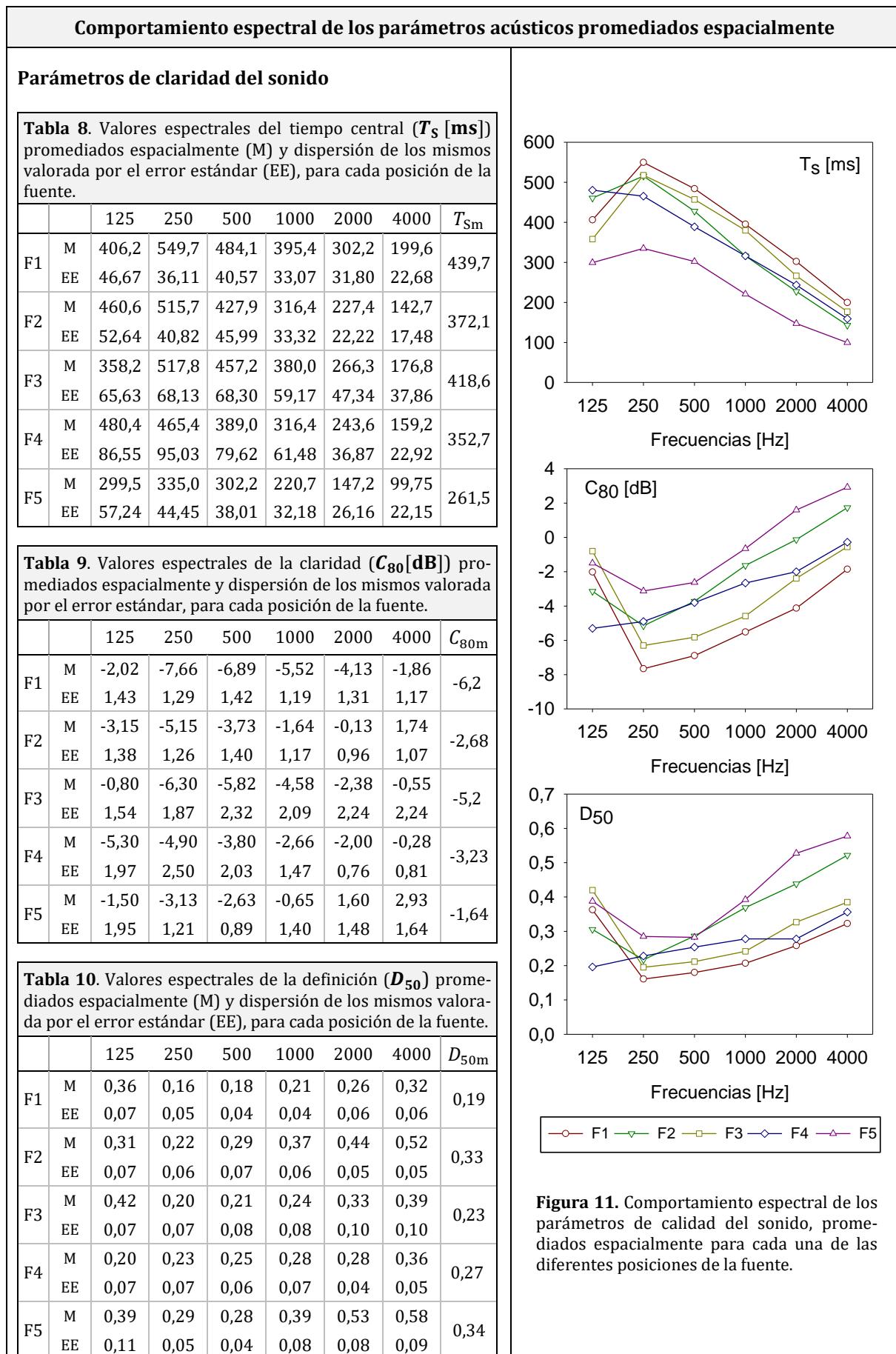
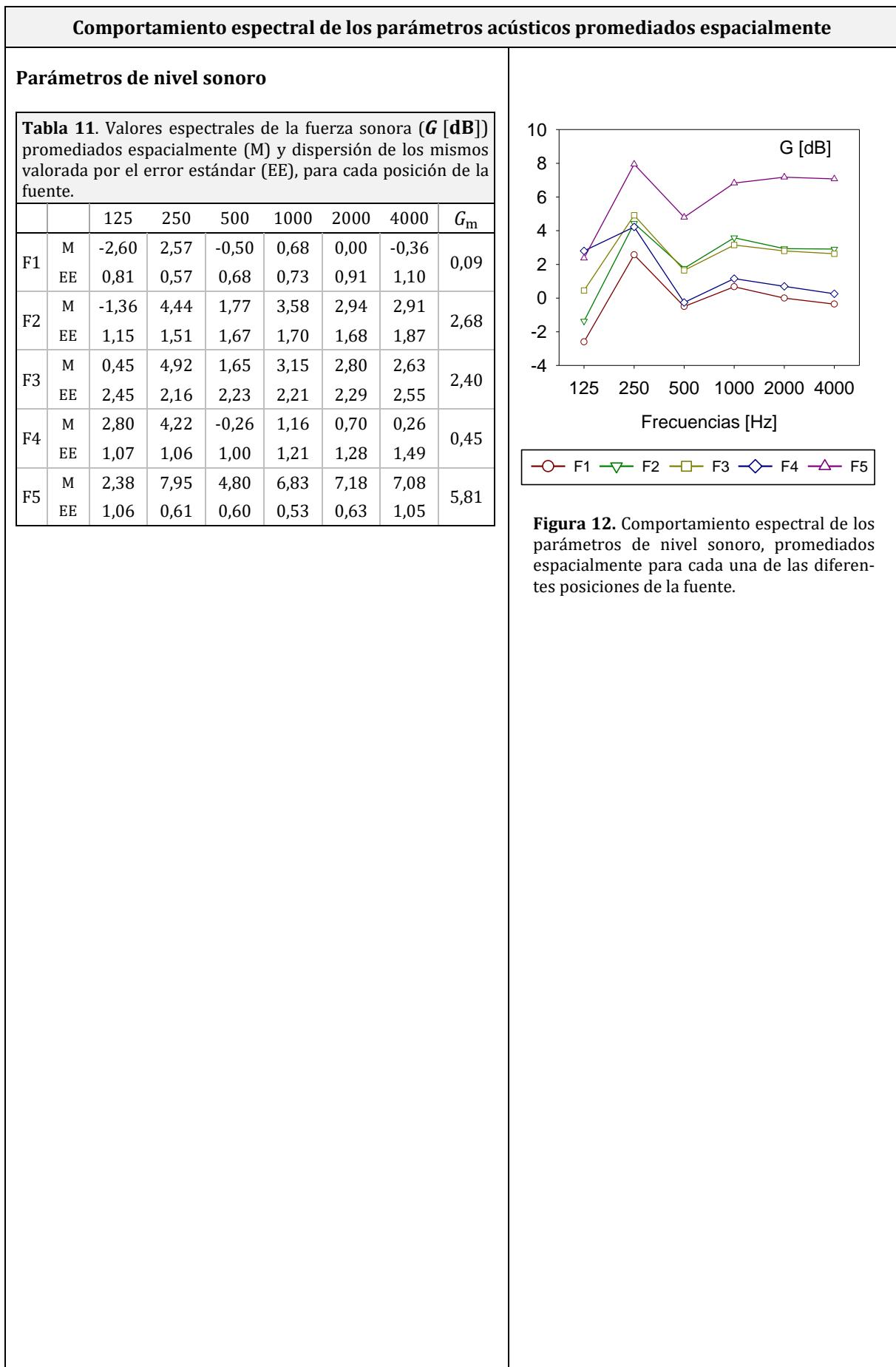
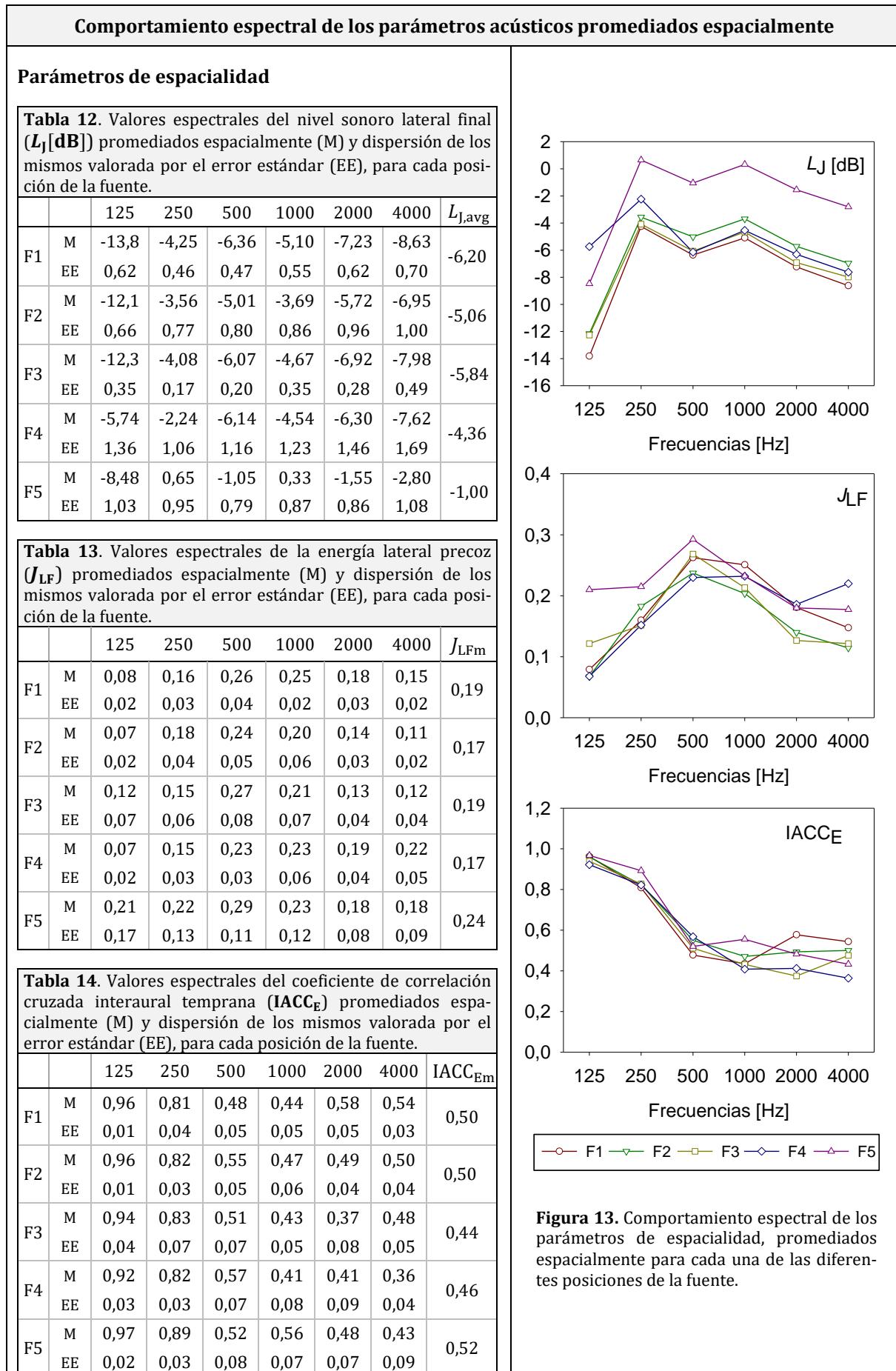
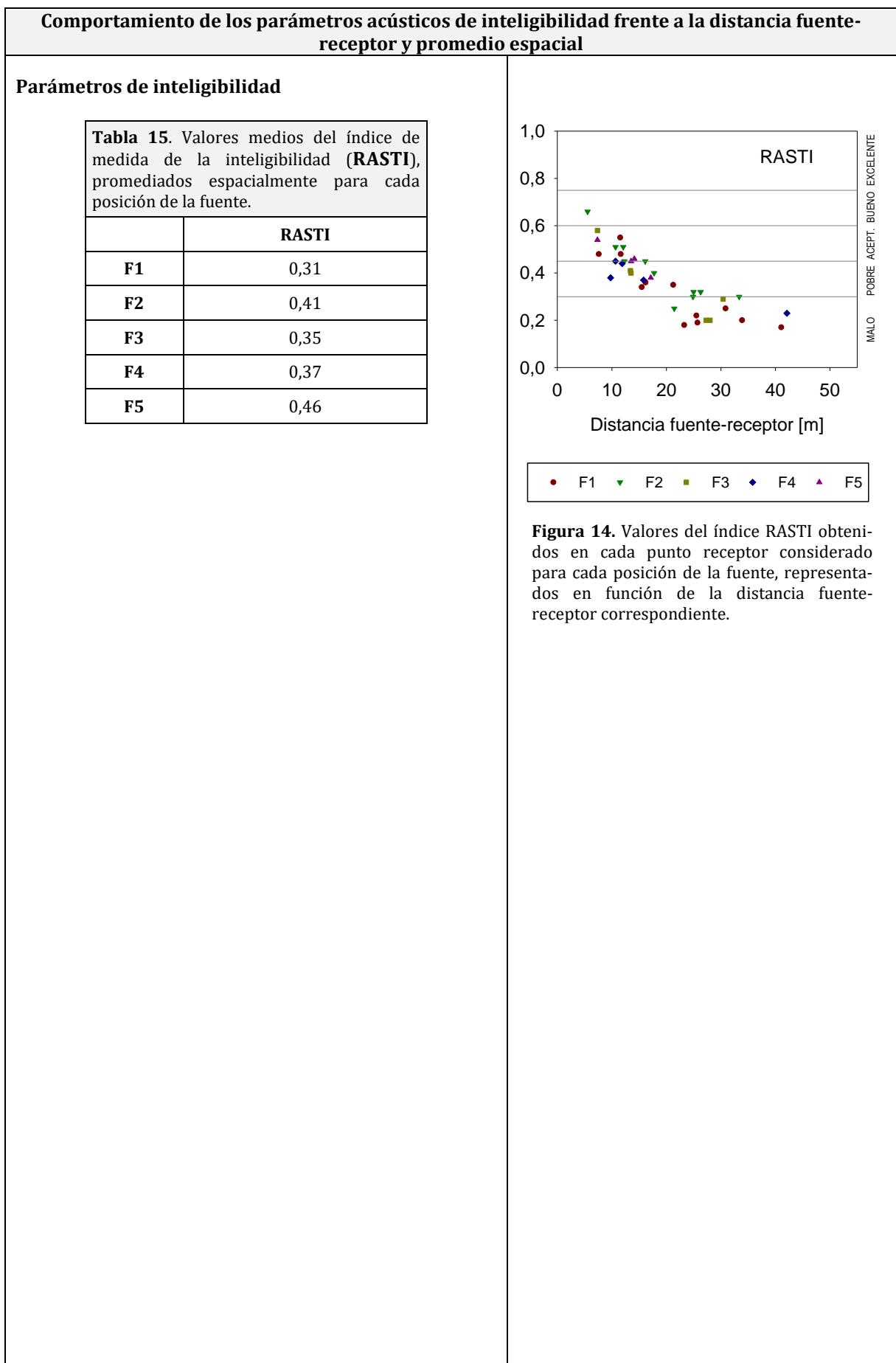


Figura 11. Comportamiento espectral de los parámetros de calidad del sonido, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.







PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*

UACC
INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA

Espacio	Catedral de Santa María de la Sede de Sevilla	
Ubicación	Avenida de la Constitución s/n - 41004 Sevilla	
Página web oficial	http://www.catedraldesevilla.es	
Fechas relevantes	Años de construcción	1401-1506
	Año de declaración como Patrimonio de la Humanidad	1987
Estilo arquitectónico	Gótico tardío	
Arquitectos destacados	Maestros Ysambret y Maese Carlín	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La Catedral gótica de Sevilla, se sitúa al sur del centro histórico de la ciudad andaluza. El solar en el que se encuentra estaba ocupado por una antigua mezquita aljama, la cual, tras la conquista, fue cristianizada y posteriormente derribada con el fin de construir el edificio gótico en la misma superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho. De la antigua mezquita solo se conservan el alminar (la Giralda) y el Patio de los Naranjos (Fig. 1).</p> <p>Ciertos historiadores datan el inicio de las obras a principios del S. XV, ya que fue en 1401 cuando el cabildo catedralicio tomó la decisión de construir un nuevo edificio, sin embargo, no existe testimonio escrito hasta 1433. El proceso constructivo, iniciado desde el trascoro hasta la cabecera, fue dirigido por diferentes maestros a lo largo de los años. Alonso Martínez es considerado como posible autor del proyecto primitivo, sucedido por otros importantes maestros mayores como Ysambret, Charles Garter (también conocido como Maese Carlín) y Alonso Rodríguez.</p> <p>En octubre de 1506, la colocación de la piedra postrera en el punto más alto del cimborrio supuso la conclusión simbólica de las obras, aunque continuaron a lo largo del tiempo diversos trabajos como la construcción de la Iglesia del Sagrario o dependencias anexas. Asimismo, se llevaron a cabo obras de restauración como consecuencia de circunstancias extraordinarias, entre las que se encuentran los desplomes del cimborrio que cubría el crucero, uno en 1511 y otro en 1888. La última obra de importancia tuvo lugar en 2008 consistente en la sustitución de 576 sillares que conformaban uno de los pilares del templo.</p> <p>En 1987 fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco y, el 25 de julio de 2010, Bien de Valor Universal Excepcional.</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior.</p>  <p>Figura 2. Planta Mezquita Aljama Almohade sobre planta actual.</p>

Descripción del espacio	Fotografías
DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR	
<p>La Catedral de Santa María de la Sede de Sevilla es la catedral gótica más grande del mundo y el tercer templo cristiano en cuánto al tamaño tras la Basílica de San Pedro en Roma y la Basílica de nuestra señora de la Aparecida en Brasil. Se articula en cinco naves orientadas al este, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central. Su estructura cuenta con 60 pilares, 32 de ellos exentos, sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren las diversas naves (Fig. 3).</p>	 
<p>En la cabecera del templo se sitúa la Capilla Real (presidida por la Virgen de los Reyes, patrona de la ciudad), donde se celebra diariamente la liturgia. Forma un amplio recinto cerrado por una ábside semicircular (Fig. 3) y cubierto por una solemne cúpula. Una gran reja cubierta con densas cortinas delimita la entrada a la misma.</p>	<p>Figura 3. Nave central desde el trascoro (izqda.) y Capilla Real (drcha.)</p>
<p>Entre las 16 capillas laterales que rodean el templo, todas colmadas de singulares altares y numerosas obras de arte, destaca la Capilla de la Virgen de la Antigua, situada en el lado sur de la catedral, en el lugar que ocupaba el mihrab de la antigua mezquita almohade, la cual posee mayores dimensiones que las demás desde el año 1500, cuando el Cardenal Diego Hurtado de Mendoza decidió situar en ella su enterramiento, y ordenó elevarla y duplicar su anchura.</p>	
<p>La capilla Mayor, delimitada por rejas de hierro dorado, se sitúa en la nave central. Cuenta con una impresionante obra de arte: el Retablo Mayor, de Pedro Dancart (1482) (Fig. 4). La nave central acoge otro de los espacios más importantes de la catedral, el coro (Fig. 5), que posee una sillería de madera tallada por diversos artistas. Su entrada está delimitada por una gran reja renacentista, y los tres lados restantes están cerrados por muros de cantería, en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales. El órgano está formado por dos grandes cajas situadas sobre los muros laterales, a ambos lados del coro.</p>	<p>Figura 4. Capilla Mayor y Retablo Mayor.</p>
<p>En el brazo derecho del crucero figura el Monumento funerario de Cristóbal Colón, que alberga parte de sus restos, traídos de Cuba en 1899 (Fig. 6).</p>	
<p>El espacio queda iluminado gracias a la luz natural que penetra a través del importantísimo conjunto de 93 vidrieras (datadas de los siglos XV – XX) que se encuentran distribuidas por todo el cuerpo principal de la catedral y las capillas adyacentes.</p>	<p>Figura 5. Sillería del coro.</p>

Descripción del espacio	Fotografías															
<p>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros, bóvedas y cúpulas de piedra (Fig. 3). - Solería de mármol blanco y azul grisáceo. - Pilares de mampostería revestidos de piedra. - Retablos de madera y de mármol. - Sillería del coro de madera (Fig. 5). - Capillas de alabastro en los muros de cantería del coro. - Bancos de madera y revestidos de terciopelo (en la Capilla Mayor) y sillería de plástico. - Rejas de hierro. 	 <p>Figura 6. Monumento funerario de Cristóbal Colón.</p>															
<p>Tabla 1. Datos geométricos del espacio.</p>																
<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="223 810 430 891" rowspan="2">Volumen</th> <th colspan="3" data-bbox="430 810 1144 891">Dimensiones máximas del templo (Catedral)</th> <th data-bbox="1144 810 1271 891" rowspan="2">Naves</th> <th data-bbox="1271 810 1438 891" rowspan="2">Capillas</th> </tr> <tr> <th data-bbox="541 862 700 891">Altura</th> <th data-bbox="700 862 859 891">Longitud</th> <th data-bbox="859 862 1017 891">Anchura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="223 891 430 983">$\approx 216.000 \text{ m}^3$</td><td data-bbox="430 891 700 983">37 m</td><td data-bbox="700 891 859 983">116 m</td><td data-bbox="859 891 1017 983">76 m</td><td data-bbox="1144 891 1271 983">5</td><td data-bbox="1271 891 1438 983">18</td></tr> </tbody> </table>		Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas	Altura	Longitud	Anchura	$\approx 216.000 \text{ m}^3$	37 m	116 m	76 m	5	18
Volumen	Dimensiones máximas del templo (Catedral)			Naves	Capillas											
	Altura	Longitud	Anchura													
$\approx 216.000 \text{ m}^3$	37 m	116 m	76 m	5	18											

Medición acústica												
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS												
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010.</p> <p>Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 30 posiciones de micrófonos distribuidos por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (ver Fig. 7).</p>												
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.												
Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010											
Fecha	6-9/06/2011											
Condiciones ambientales (T ^a / Humedad relativa)	24°C / 45%											
Ocupación del recinto	Desocupado											
Nº Posiciones de fuente ($h_F = 1,50 \text{ m}$)	5											
Nº de receptores ($h_R = 1,20 \text{ m}$)	30											
Señal de excitación	<i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal. <i>Duración:</i> 20 s <i>Rango de frecuencias:</i> 63 – 16000 Hz											
Figura 7. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).												
Tabla 3. Resumen de las posiciones de la fuente y los receptores caracterizados.												
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5							
Ubicación de la fuente	Altar Mayor	Altar del Corpus	Coro	Trascoro	Capilla Real							
Número total de receptores caracterizados	19	11	20	7	4							
Receptores con sonido directo	R1 R2 R7 R8 R9 R10 R11 R12	R13 R14 R15 R17 R18 R26 R27 R28	R5 R6 R8 R9 R10 R12 R13 R16	R17 R19 R20 R21 R27 R28 R10 R11	R13 R14 R15 R27 R28 R10 R11 R12	R19 R20 R21 R22 R23 R24 R25	R3 R4 R29 R30					
Receptores sin sonido directo	R5 R6 R16	-	-	-	-	-	-					

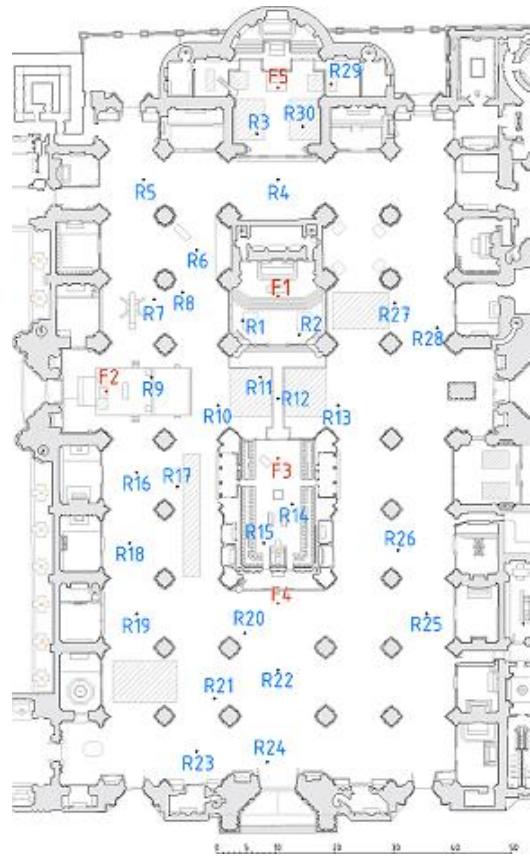


Figura 7. Planta de la catedral con las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R).

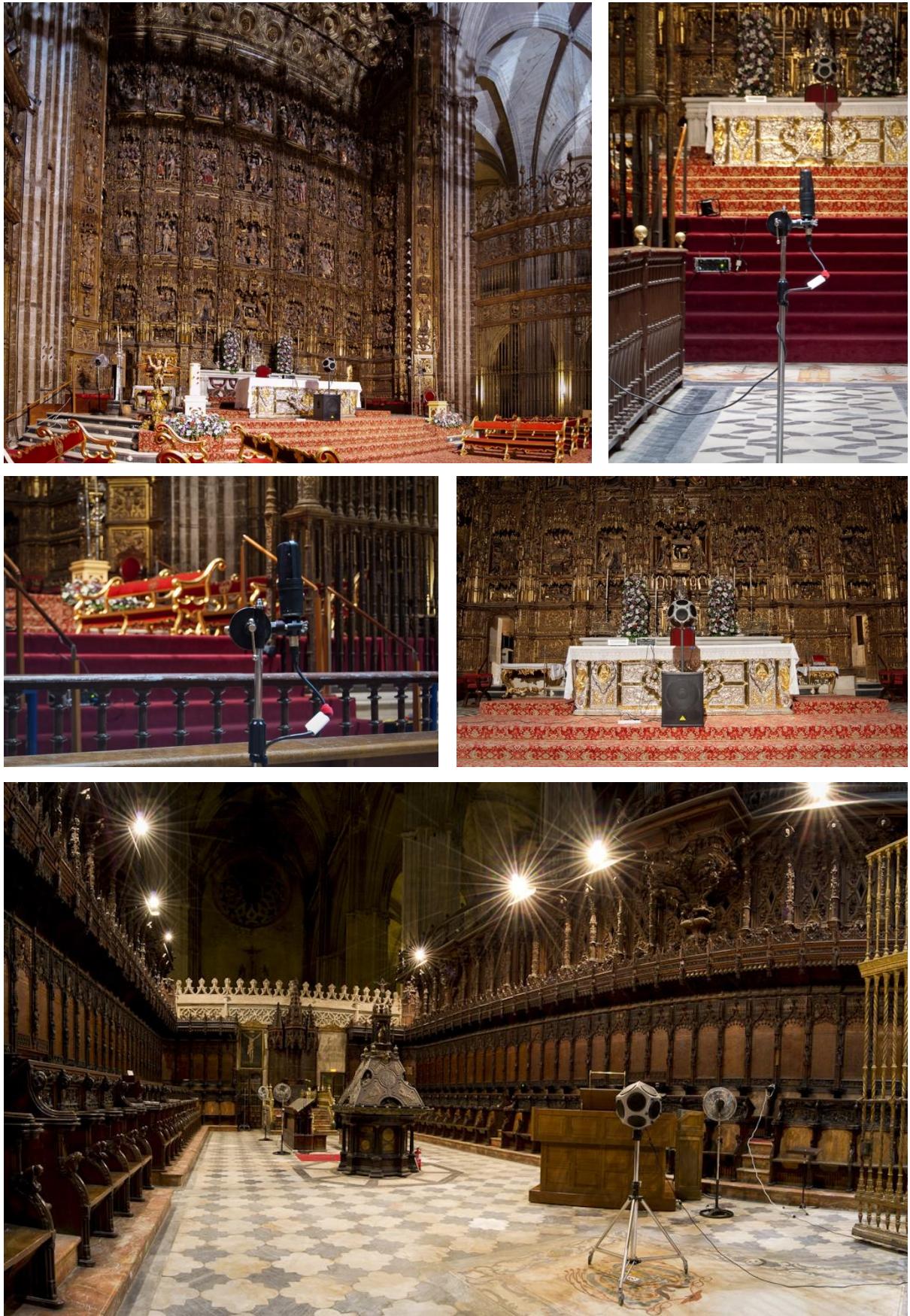
Posición de la fuente	F1	F2	F3	F4	F5		
Ubicación de la fuente	Altar Mayor	Altar del Corpus	Coro	Trascoro	Capilla Real		
Número total de receptores caracterizados	19	11	20	7	4		
Receptores con sonido directo	R1 R2 R7 R8 R9 R10 R11 R12	R13 R14 R15 R17 R18 R26 R27 R28	R5 R6 R8 R9 R10 R12 R13 R16	R17 R19 R20 R21 R27 R28 R10 R11	R13 R14 R15 R27 R28 R10 R11 R12	R19 R20 R21 R22 R23 R24 R25	R3 R4 R29 R30
Receptores sin sonido directo	R5 R6 R16	-	-	-	-	-	-

Nota:

La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

Medición acústica																																																					
EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN																																																					
<p>El proceso de generación y adquisición de la señal se ha llevado a cabo con el programa WinMLS2004, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101 de 8 canales. La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro. Las RIIs monoaurales se capturaron con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización Earthworks-LAB 1; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza binaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p> <p>El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 30,7 dBA. La Figura 8 representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NCB, que se puede valorar como NCB-30.</p> <p>La relación señal/ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (Fig. 9).</p> <p>Tabla 4. Valores espectrales de la relación señal ruido impulsiva (INR [dB]) promediados espacialmente (M) y su dispersión valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frec.[Hz]</th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F1</td> <td>M EE</td> <td>57,82 1,22</td> <td>62,96 1,05</td> <td>66,16 0,92</td> <td>65,64 1,16</td> <td>69,71 1,04</td> <td>66,09 1,28</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>M EE</td> <td>61,95 1,26</td> <td>66,93 1,05</td> <td>65,15 1,56</td> <td>65,77 1,51</td> <td>72,80 1,07</td> <td>71,78 0,96</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>M EE</td> <td>59,95 1,51</td> <td>62,89 1,77</td> <td>64,99 2,07</td> <td>65,70 2,18</td> <td>67,35 2,13</td> <td>62,78 2,57</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>M EE</td> <td>66,59 1,07</td> <td>71,03 1,29</td> <td>69,57 2,33</td> <td>69,47 3,28</td> <td>75,63 3,05</td> <td>73,11 2,14</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>M EE</td> <td>66,25 1,55</td> <td>74,53 0,32</td> <td>74,68 0,94</td> <td>76,00 1,70</td> <td>80,88 1,72</td> <td>76,85 1,69</td> </tr> </tbody> </table> <p>Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder (Fig. 10).</p>							Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	F1	M EE	57,82 1,22	62,96 1,05	66,16 0,92	65,64 1,16	69,71 1,04	66,09 1,28	F2	M EE	61,95 1,26	66,93 1,05	65,15 1,56	65,77 1,51	72,80 1,07	71,78 0,96	F3	M EE	59,95 1,51	62,89 1,77	64,99 2,07	65,70 2,18	67,35 2,13	62,78 2,57	F4	M EE	66,59 1,07	71,03 1,29	69,57 2,33	69,47 3,28	75,63 3,05	73,11 2,14	F5	M EE	66,25 1,55	74,53 0,32	74,68 0,94	76,00 1,70	80,88 1,72	76,85 1,69
Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000																																															
F1	M EE	57,82 1,22	62,96 1,05	66,16 0,92	65,64 1,16	69,71 1,04	66,09 1,28																																														
F2	M EE	61,95 1,26	66,93 1,05	65,15 1,56	65,77 1,51	72,80 1,07	71,78 0,96																																														
F3	M EE	59,95 1,51	62,89 1,77	64,99 2,07	65,70 2,18	67,35 2,13	62,78 2,57																																														
F4	M EE	66,59 1,07	71,03 1,29	69,57 2,33	69,47 3,28	75,63 3,05	73,11 2,14																																														
F5	M EE	66,25 1,55	74,53 0,32	74,68 0,94	76,00 1,70	80,88 1,72	76,85 1,69																																														
<p>Figura 8. Nivel del ruido de fondo medido sobre curvas NCB.</p>																																																					
<p>Figura 9. Valor promedio espacial de la relación señal – ruido impulsiva.</p>																																																					
<p>Figura 10. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el receptor 13 filtradas a 1 kHz.</p>																																																					

Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas



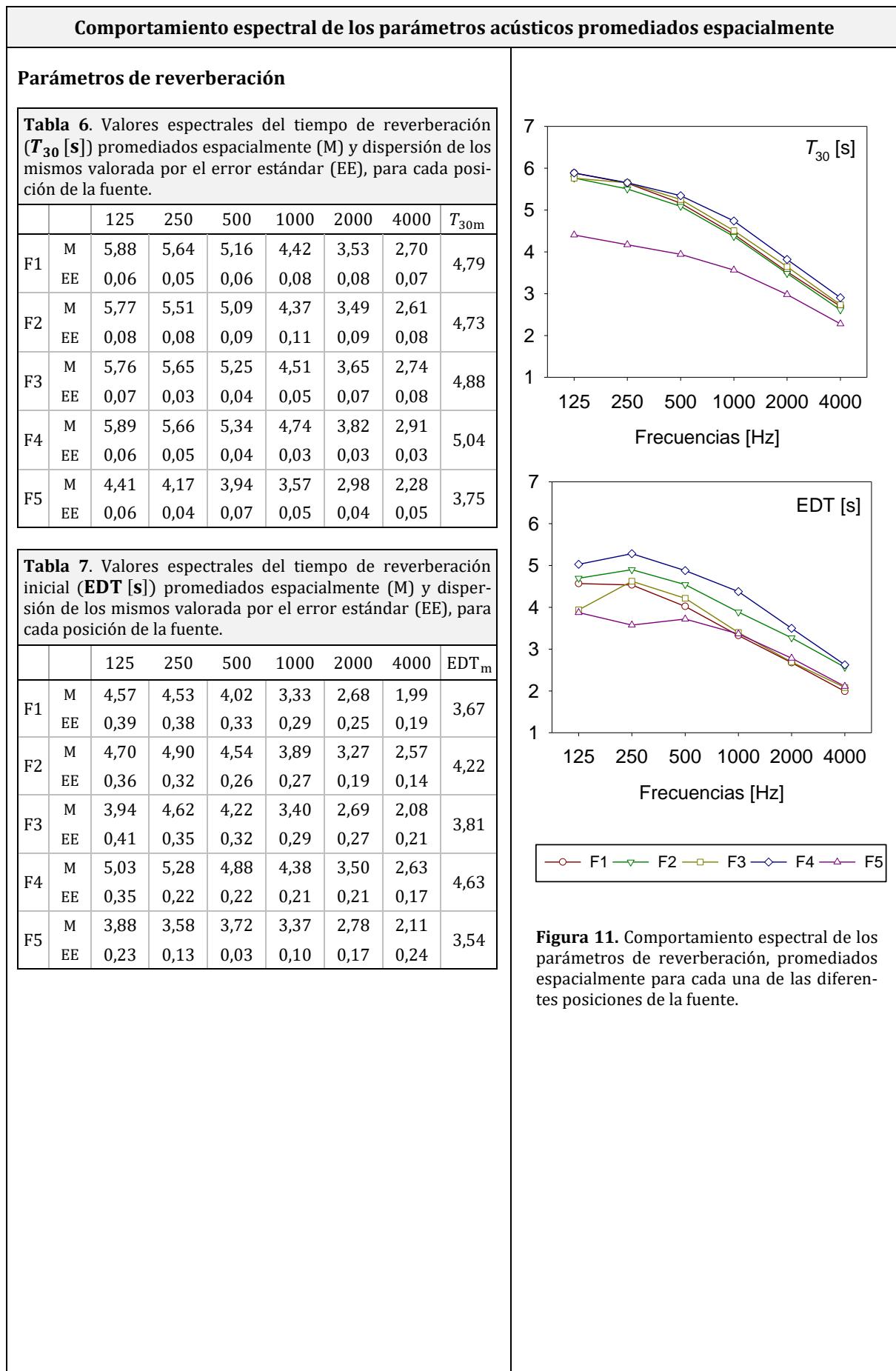
Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente					
Tabla 5. Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente ^a .					
Posición de fuente	F1	F2	F3	F4	F5
Ubicación de fuente	Altar mayor	Altar del Corpus	Coro	Trascoro	Capilla Real
T_{30m} [s]	4,79	4,73	4,88	5,04	3,75
EDT_m [s]	3,67	4,22	3,81	4,63	3,54
T_{Sm} [ms]	240,16	286,68	236,69	292,64	190,25
C_{50m} [dB]	-3,60	-5,22	-3,03	-4,09	-1,84
C_{80m} [dB]	-2,18	-4,03	-1,77	-3,09	-0,46
D_{50m}	0,32	0,26	0,36	0,30	0,40
G_m [dB]	-5,03	-3,90	-7,25	-0,48	5,59
L_{J,avg} [dB]	-11,44	-9,23	-13,99	-6,36	-1,99
J_{LFm}	0,12	0,15	0,10	0,08	0,17
BR^b	1,20	1,19	1,17	1,14	1,14
B_r^b	0,65	0,64	0,65	0,67	0,70
IACC_{Em}	---	---	---	---	---
IACC_{Lm}	---	---	---	---	---
IACC_{Am}	---	---	---	---	---
RASTI^b	0,44	0,40	0,43	0,40	0,48
STI^b	0,47	0,45	0,50	0,45	0,52

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.

Nota:

Los valores del coeficiente de correlación interaural no están disponibles debido a que las respuestas al impulso binaurales no pudieron registrarse de forma correcta a causa de problemas técnicos durante la sesión de medidas.



Comportamiento espectral de los parámetros acústicos promediados espacialmente									
Parámetros de claridad del sonido									
Tabla 8. Valores espectrales del tiempo central (T_s [ms]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.									
		125	250	500	1000	2000	4000	T_{sm}	
F1	M	300,6	340,5	275,1	205,2	150,2	109,2	240,2	
	EE	31,55	35,05	31,05	25,97	18,70	13,97		
F2	M	334,4	353,4	333,4	239,9	169,4	115,9	286,7	
	EE	37,81	29,22	32,87	33,05	22,75	14,60		
F3	M	191,1	265,8	279,4	194,0	158,5	117,9	236,7	
	EE	23,14	27,38	30,37	30,38	20,62	14,94		
F4	M	285,4	308,9	300,0	285,3	202,6	146,3	292,6	
	EE	35,11	28,26	31,31	41,15	27,62	21,62		
F5	M	203,2	240,2	215,2	165,2	119,2	79,0	190,2	
	EE	19,77	20,47	20,95	19,16	9,28	6,87		
Tabla 9. Valores espectrales de la claridad (C_{80} [dB]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.									
		125	250	500	1000	2000	4000	C_{80m}	
F1	M	-3,11	-5,39	-3,26	-1,11	0,89	2,38	-2,18	
	EE	1,13	1,46	1,22	1,16	1,02	1,01		
F2	M	-4,46	-5,33	-5,62	-2,45	0,28	1,66	-4,03	
	EE	1,05	0,81	1,18	1,20	0,90	0,90		
F3	M	1,99	-1,09	-3,20	-0,33	0,75	1,91	-1,77	
	EE	0,92	1,00	1,19	1,42	1,16	1,06		
F4	M	-1,21	-2,30	-2,77	-3,41	-1,20	0,36	-3,09	
	EE	1,11	0,95	1,18	1,91	1,59	1,50		
F5	M	0,45	-2,38	-1,48	0,55	2,33	3,75	-0,46	
	EE	0,91	1,13	1,30	0,92	0,68	0,70		
Tabla 10. Valores espectrales de la definición (D_{50}) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.									
		125	250	500	1000	2000	4000	D_{50m}	
F1	M	0,28	0,22	0,28	0,37	0,46	0,54	0,32	
	EE	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05		
F2	M	0,25	0,21	0,19	0,33	0,46	0,50	0,26	
	EE	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05		
F3	M	0,54	0,39	0,29	0,43	0,46	0,50	0,36	
	EE	0,04	0,05	0,04	0,07	0,06	0,05		
F4	M	0,37	0,33	0,31	0,29	0,40	0,46	0,30	
	EE	0,05	0,04	0,06	0,10	0,08	0,08		
F5	M	0,44	0,31	0,34	0,45	0,57	0,59	0,40	
	EE	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,05		

T_s [ms]

Frecuencias [Hz]

C_{80} [dB]

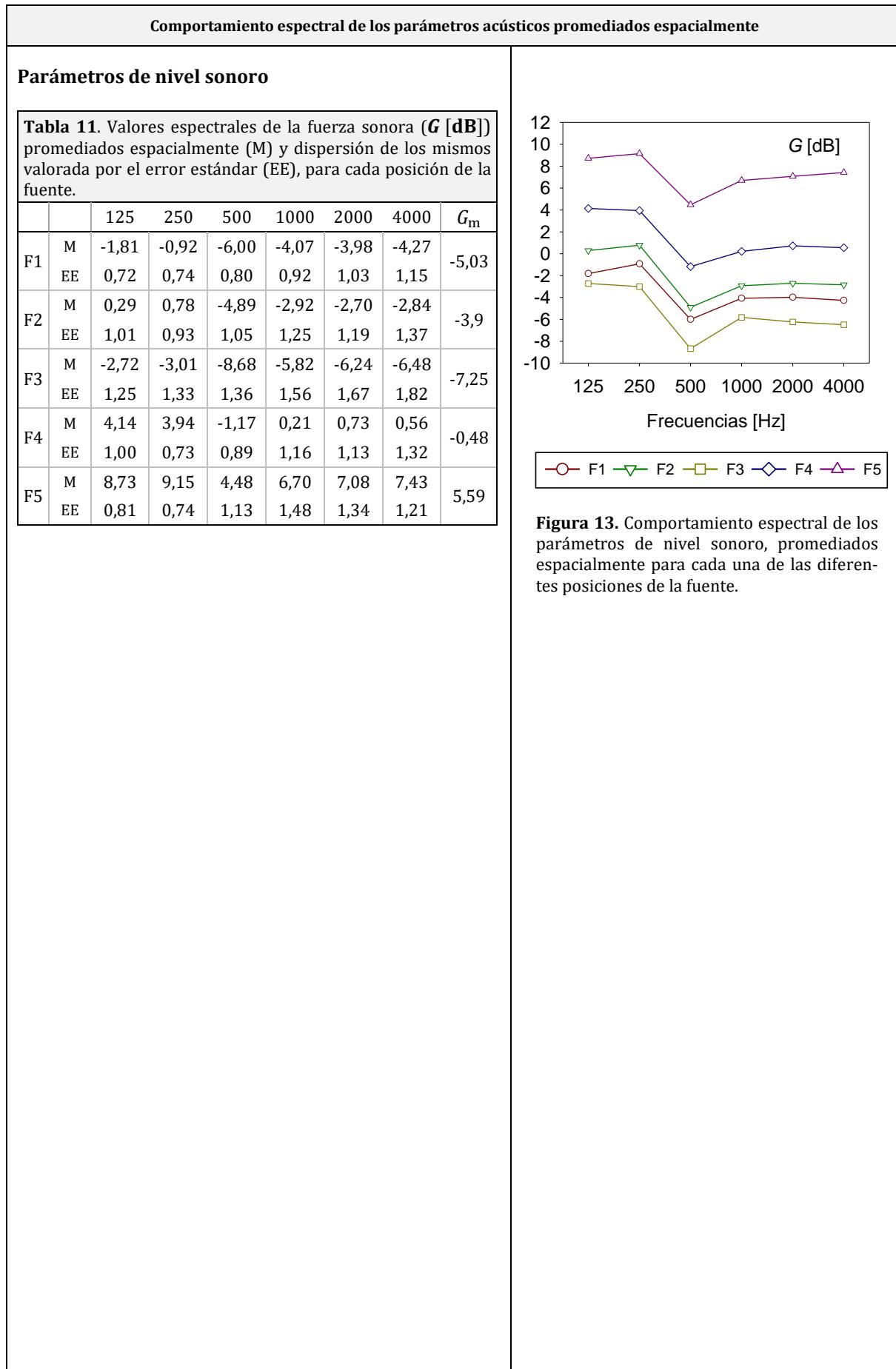
Frecuencias [Hz]

D_{50}

Frecuencias [Hz]

—○— F1 —▽— F2 —□— F3 —△— F4 —▲— F5

Figura 12. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.



Comportamiento espectral de los parámetros acústicos promediados espacialmente												
Parámetros de espacialidad												
Tabla 12. Valores espectrales del nivel sonoro lateral final (L_J [dB]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.												
		125	250	500	1000	2000	4000	L_J ,avg				
F1	M	-12,9	-9,15	-13,4	-11,8	-13,5	-14,8		-11,4			
	EE	0,60	0,55	0,56	0,60	0,64	0,72					
F2	M	-9,83	-6,99	-11,3	-10,1	-11,7	-13,0		-9,23			
	EE	0,70	0,72	0,77	0,89	0,93	1,02					
F3	M	-15,8	-11,8	-15,6	-14,2	-15,9	-17,0		-14,0			
	EE	0,85	0,99	1,04	1,04	1,13	1,29					
F4	M	-7,24	-4,40	-8,23	-6,60	-8,04	-8,84		-6,36			
	EE	0,46	0,35	0,37	0,40	0,38	0,46					
F5	M	-4,00	-0,23	-3,43	-1,45	-3,03	-3,70		-1,99			
	EE	1,68	1,34	1,53	1,59	1,77	1,96					
Tabla 13. Valores espectrales de la energía lateral precoz (J_{LF}) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.												
		125	250	500	1000	2000	4000	J_{LF} ,m				
F1	M	0,08	0,13	0,13	0,15	0,11	0,11		0,12			
	EE	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01					
F2	M	0,08	0,17	0,19	0,16	0,10	0,09		0,15			
	EE	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02					
F3	M	0,06	0,09	0,14	0,13	0,10	0,10		0,10			
	EE	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01					
F4	M	0,03	0,07	0,10	0,13	0,07	0,08		0,08			
	EE	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01					
F5	M	0,12	0,18	0,21	0,17	0,12	0,14		0,17			
	EE	0,05	0,07	0,07	0,06	0,04	0,04					
Tabla 14. Valores espectrales del coeficiente de correlación cruzada interaural temprana ($IACC_E$) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE), para cada posición de la fuente.												
		125	250	500	1000	2000	4000	$IACC_E$,m				
F1	M											
	EE											
F2	M											
	EE											
F3	M	NO DISPONIBLES POR RAZONES TÉCNICAS										
	EE											
F4	M											
	EE											
F5	M											
	EE											

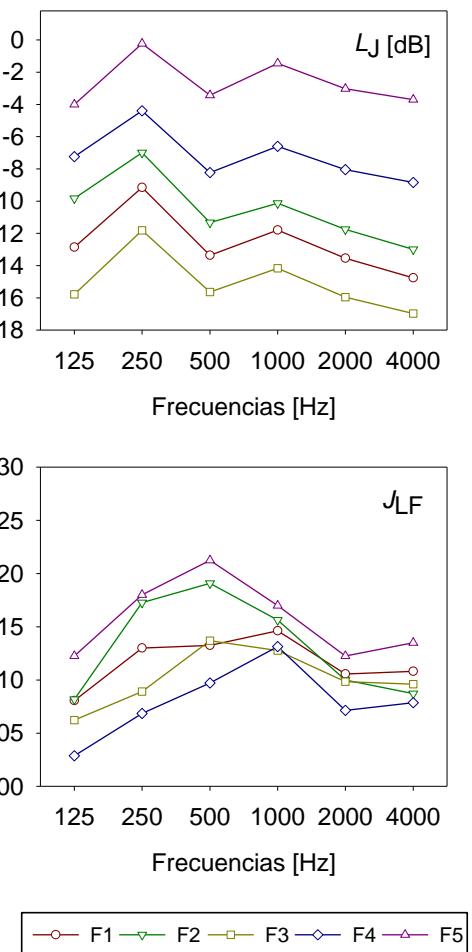


Figura 14. Comportamiento espectral de los parámetros de espacialidad, promediados espacialmente para cada una de las diferentes posiciones de la fuente.

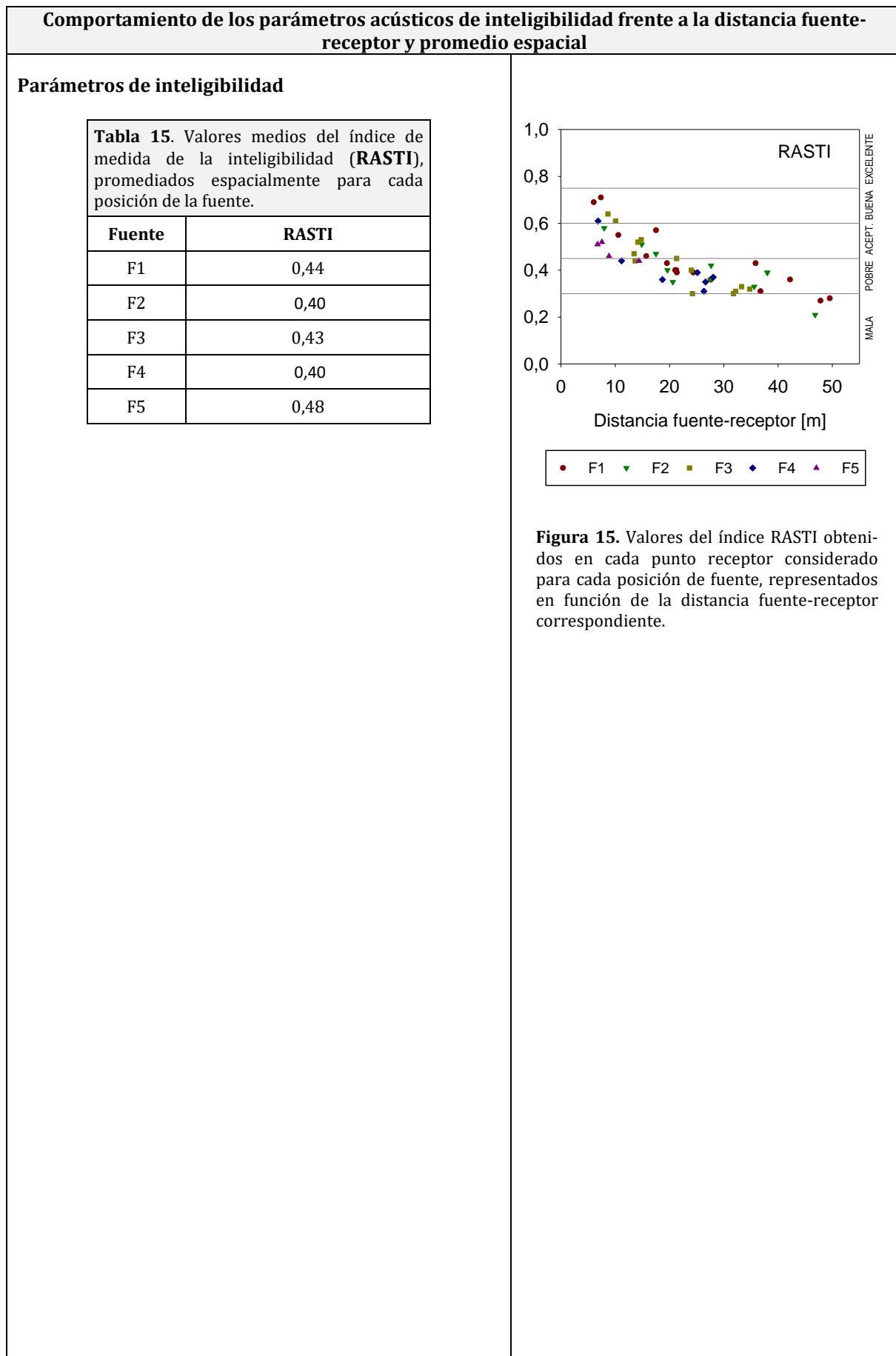


Figura 15. Valores del índice RASTI obtenidos en cada punto receptor considerado para cada posición de fuente, representados en función de la distancia fuente-receptor correspondiente.

PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*
UACC
 INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA		
Espacio	Cripta de la Catedral de Cádiz.	
Ubicación	Plaza de la Catedral, nº 7, 11005, Cádiz	
Página web oficial	http://www.catedraldecadiz.com	
Fechas relevantes	Año de construcción de la Cripta de la Catedral	1730 - 1732
	Catalogada Bien de Interés Cultural (BIC), Monumento	Junio 1931
Arquitectos destacados	Vicente Acero	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO Y DESCRIPCIÓN</p> <p>Es obra del proyectista original, Vicente Acero y, según los archivos catedralicios, se construye entre 1730 y 1732.</p> <p>Desde la catedral, por medio de unas escaleras dispuestas simétricamente a ambos lados del altar mayor se accede a la cripta. Este espacio está conformado por un vestíbulo central presidido por el singular elemento arquitectónico que lo cubre: una gran bóveda, prácticamente sin curvatura, la cual alcanza una altura de 5 metros en su punto más elevado (Fig. 1).</p> <p>Cinco galerías longitudinales se distribuyen desde este amplio y diáfano espacio circular, en las que destacan los techos planos de las capillas que rematan al final de cada una de ellas. En la galería central al fondo se ubica la Capilla de los Obispos (Fig. 2), un recinto custodiado por rejas, que alberga un altar presidido por la figura del Cristo de Aguiniga, donde descansan los prelados que han muerto en Cádiz desde la consagración de la Catedral Nueva.</p> <p>Entre otras personalidades, se encuentran enterrados en la cripta dos ilustres gaditanos: el músico universal Manuel de Falla, y el poeta José María Pemán. Sus tumbas se encuentran ubicadas en una de las galerías laterales, ligeramente diferente al resto (Fig. 3). Dicha galería está, además, a un nivel levemente inferior al resto.</p> <p>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros y bóveda central de piedra conchífera, denominada piedra ostionera. - Solería de piedra gris de Tarifa o losa de Tarifa. - Una de las galerías laterales, revestida parcialmente de chapa de acero (Tumba de M. Falla), y con granito en el suelo y los zócalos. - Nichos y tumbas de mármol. 	 <p>Figura 1. Bóveda que cubre el vestíbulo central circular de la Cripta y escaleras de acceso.</p>  <p>Figura 2. Vista interior de una de las galerías. Capilla de los Obispos.</p>  <p>Figura 3. Tumba de Manuel de Falla. Decoración de la galería lateral.</p>

Descripción del espacio		Fotografías			
Tabla 1. Datos geométricos del espacio.					
Volumen	Dimensiones máximas del espacio (Cripta)			Galerías	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
≈3.000 m ³	5 m	45 m	45 m	5	6

Medición acústica					
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS			Planta de la cripta		
Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Se han considerado 2 posiciones de fuente, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las celebraciones/actuaciones que tienen lugar en la cripta. Se fijaron 13 posiciones de micrófonos distribuidas por las diferentes galerías y la zona de la rotonda central (Fig. 4).					
Tabla 2. Datos principales de la sesión de medidas.					
Norma aplicada UNE-EN-ISO 3382-1:2010 Fecha 04-05/06/2012 Condiciones ambientales (Temperatura / Humedad rel.) 20°C / 71-78% Ocupación del recinto Desocupado Nº posiciones de fuente 2 ($h_F = 1,50 \text{ m}$) Nº de receptores 13 ($h_R = 1,20 \text{ m}$)					
Señal de excitación <i>Tipo:</i> Barrido exponencial sinusoidal <i>Duración:</i> 21,8 s <i>Rango frecuencias:</i> 63 – 16000 Hz					

Resumen de las posiciones de la fuente y receptores caracterizados.					
Posición de la fuente		F1		F2	
Ubicación de la fuente		Altar mayor		Interior de la rotonda	
Número total de receptores caracterizados		13		13	
Receptores con sonido directo		R1	R9	R1	R8
		R3	R10	R2	R9
		R5	R11	R3	R10
		R6	R12	R4	R11
		R7	R13	R5	R12
		R8		R6	R13
Receptores sin sonido directo		R2	R4	R7	

Nota: La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

Medición acústica																																																								
<p>EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN</p> <p>El proceso de generación y adquisición de la señal se ha llevado a cabo con el programa EASERA v.1.2, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro. La RI monoaural se capturó con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización SoundField SMP200; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza biaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p> <p>El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 26,7 dBA.</p> <p>La relación señal/ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés, incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (Fig. 5).</p> <p>Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder (Fig. 6).</p>	<table border="1"> <caption>Data for Figure 5: INR measured vs Frequency</caption> <thead> <tr> <th>Frecuencia [Hz]</th> <th>INR medido [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>125</td><td>62</td></tr> <tr><td>250</td><td>65</td></tr> <tr><td>500</td><td>68</td></tr> <tr><td>1000</td><td>65</td></tr> <tr><td>2000</td><td>74</td></tr> <tr><td>4000</td><td>84</td></tr> <tr><td>8000</td><td>92</td></tr> </tbody> </table> <p>Figura 5. Valor promedio espacial de la relación señal – ruido impulsiva.</p> <table border="1"> <caption>Data for Figure 6: Energy and Schroeder Integral</caption> <thead> <tr> <th>Tiempo [s]</th> <th>Energía [dB]</th> <th>Integral de Schroeder [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>-5</td><td>-5</td></tr> <tr><td>2</td><td>-10</td><td>-10</td></tr> <tr><td>3</td><td>-20</td><td>-20</td></tr> <tr><td>4</td><td>-35</td><td>-35</td></tr> <tr><td>5</td><td>-45</td><td>-45</td></tr> <tr><td>6</td><td>-55</td><td>-55</td></tr> <tr><td>7</td><td>-60</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>-65</td><td>-65</td></tr> <tr><td>9</td><td>-70</td><td>-70</td></tr> <tr><td>10</td><td>-75</td><td>-75</td></tr> <tr><td>11</td><td>-80</td><td>-80</td></tr> </tbody> </table> <p>Figura 6. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas para la fuente F1 y el punto 5 filtradas a 1 kHz.</p>	Frecuencia [Hz]	INR medido [dB]	125	62	250	65	500	68	1000	65	2000	74	4000	84	8000	92	Tiempo [s]	Energía [dB]	Integral de Schroeder [dB]	0	0	0	1	-5	-5	2	-10	-10	3	-20	-20	4	-35	-35	5	-45	-45	6	-55	-55	7	-60	0	8	-65	-65	9	-70	-70	10	-75	-75	11	-80	-80
Frecuencia [Hz]	INR medido [dB]																																																							
125	62																																																							
250	65																																																							
500	68																																																							
1000	65																																																							
2000	74																																																							
4000	84																																																							
8000	92																																																							
Tiempo [s]	Energía [dB]	Integral de Schroeder [dB]																																																						
0	0	0																																																						
1	-5	-5																																																						
2	-10	-10																																																						
3	-20	-20																																																						
4	-35	-35																																																						
5	-45	-45																																																						
6	-55	-55																																																						
7	-60	0																																																						
8	-65	-65																																																						
9	-70	-70																																																						
10	-75	-75																																																						
11	-80	-80																																																						

Medición acústica. Fotos de la sesión de medidas



Parámetros acústicos promediados espectralmente

Tabla 4. Parámetros acústicos promediados^a espacial y espectralmente.

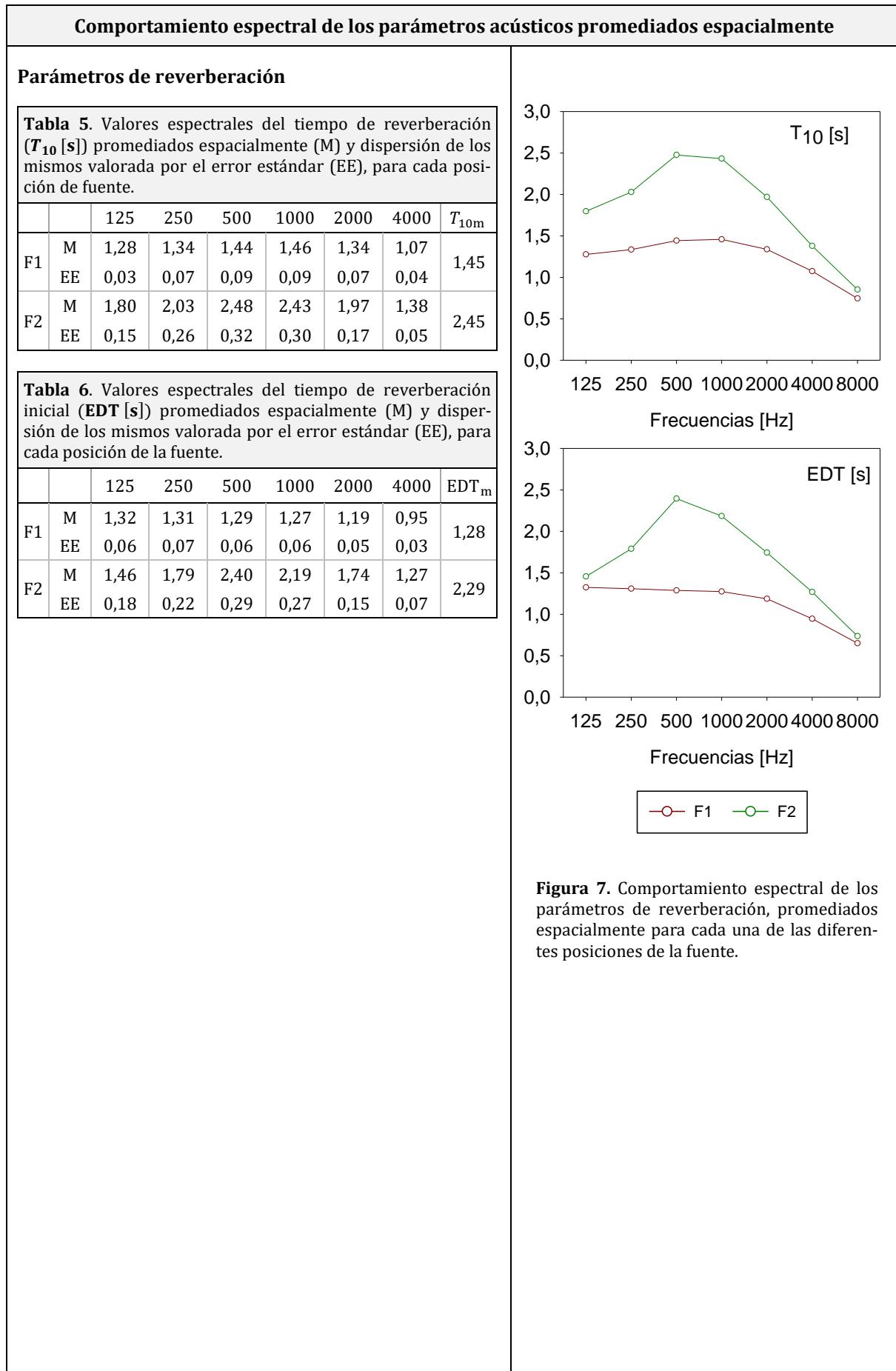
Posición de fuente	F1	F2
Ubicación de fuente	Altar mayor	Interior de la rotonda
T_{30m} [s]	1,45	2,45
EDT_m [s]	1,28	2,29
T_{Sm} [ms]	93,69	138,65
C_{50m} [dB]	-1,32	-1,82
C_{80m} [dB]	1,98	0,57
D_{50m}	0,43	0,40
G_m [dB]	---	---
$L_{J,avg}$ [dB]	---	---
J_{LFm}	0,18	0,11
BR^b	0,90	0,78
B_r^b	0,83	0,68
$IACC_{Em}$	0,56	0,50
$IACC_{Lm}$	0,22	0,24
$IACC_{Am}$	0,43	0,37
$RASTI^b$	0,55	0,50
STI^b	0,59	0,55

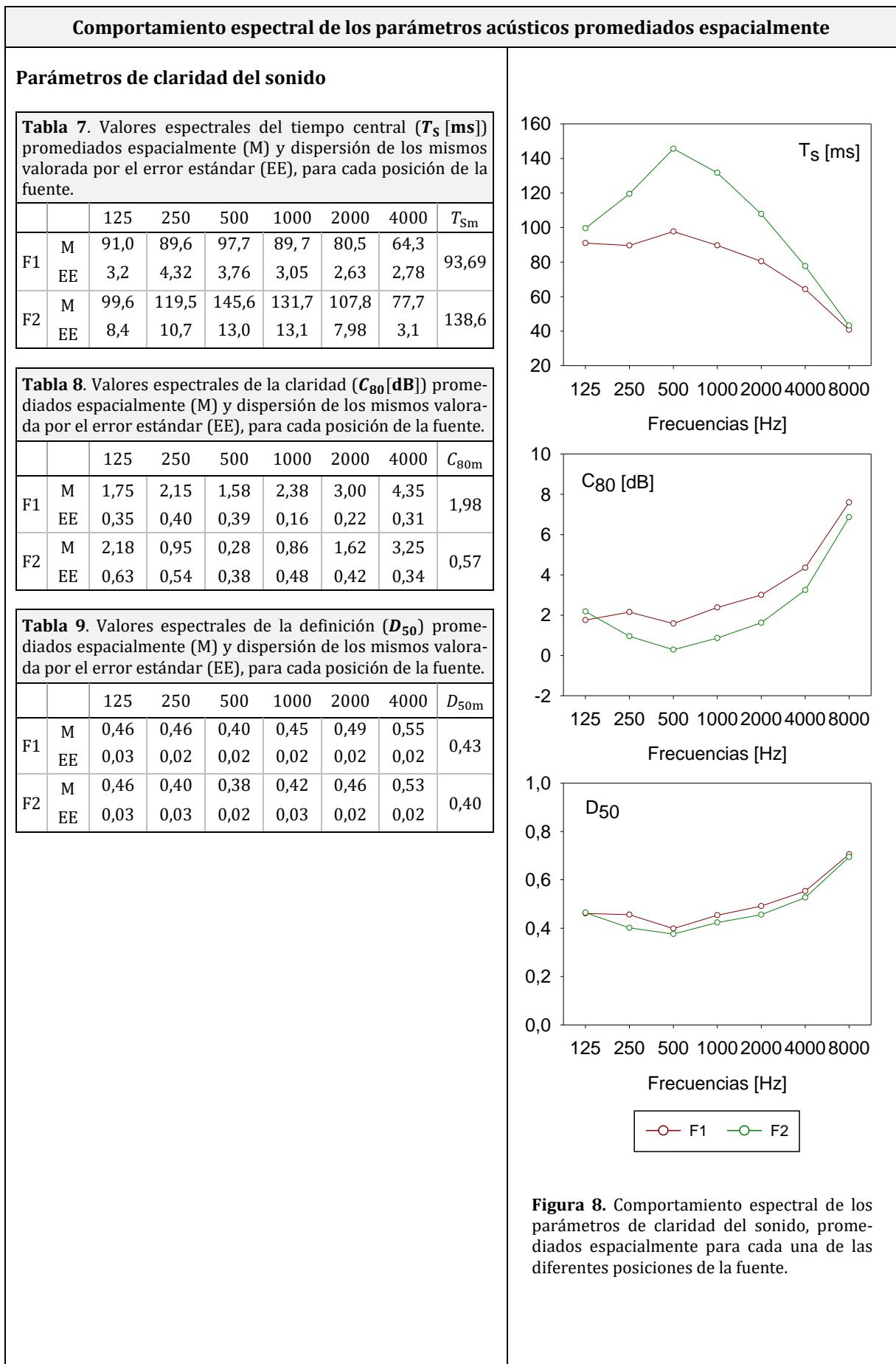
^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

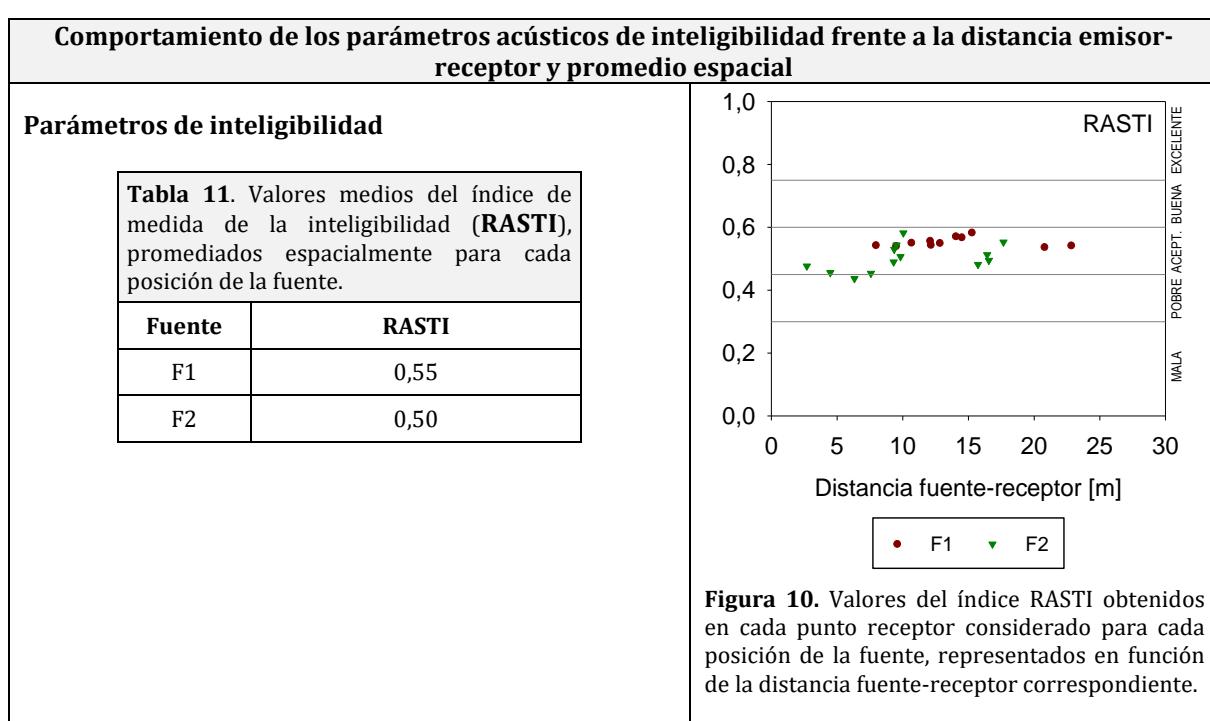
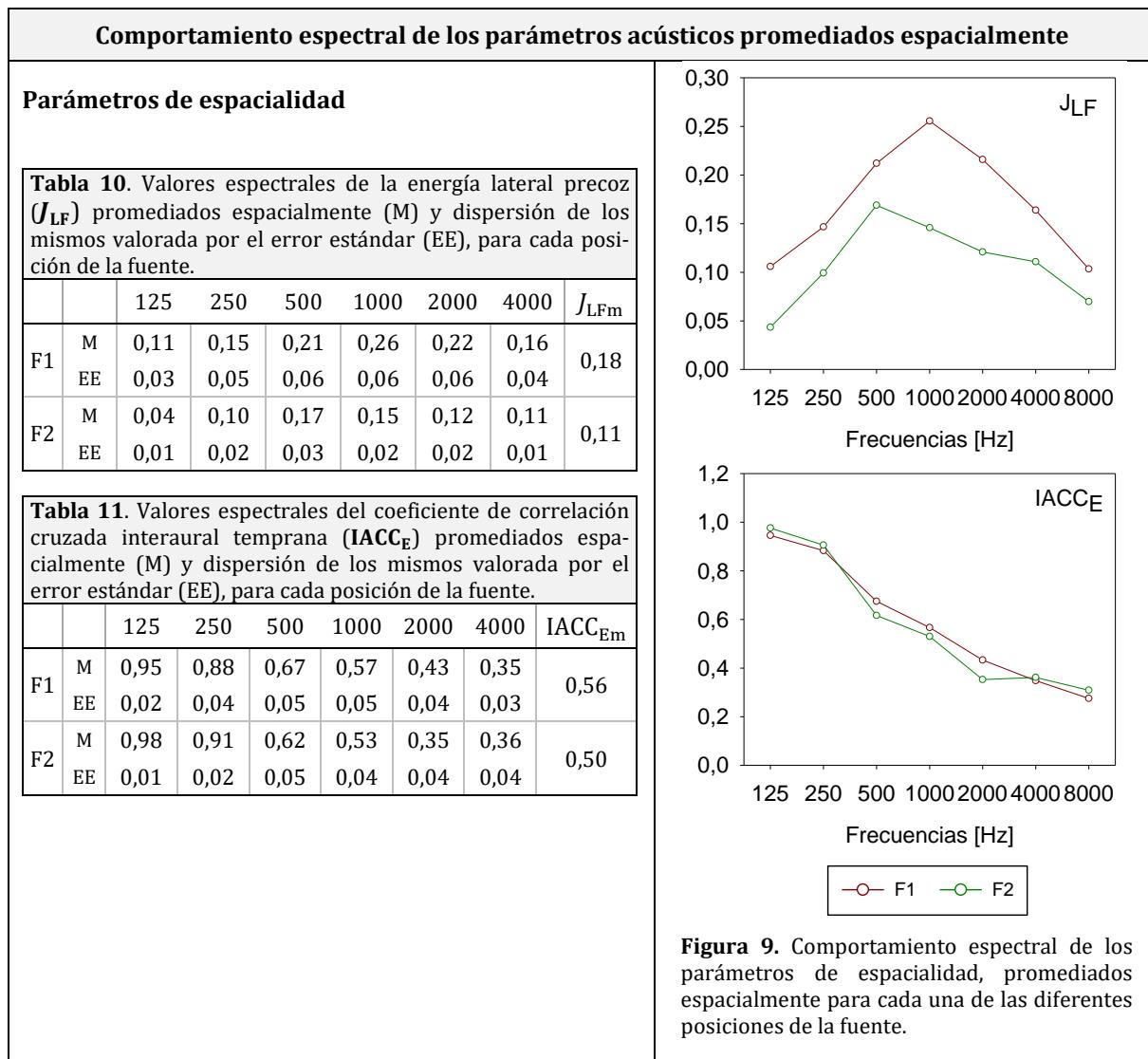
^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. El RASTI y el STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.

Nota:

Los valores del G y L_J no están disponibles debido a que no se disponían de señales de calibración necesarias para su cálculo.







PROYECTO: BIA2010-20523:*La Acústica de las Catedrales:**Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*
UACC
 INSTITUTO UNIVERSITARIO
ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN

FICHA TÉCNICA		
Espacio	Sacristía de la Santa Iglesia Catedral de Jaén	
Ubicación	Plaza de Santa María s/n - 23003 - Jaén	
Página web oficial	www.catedraldejaen.org	
Fechas relevantes	Años de construcción	1.555 - 1.577
Estilo arquitectónico	Renacentista	
Arquitectos destacados	Andrés de Vandelvira	

Descripción del espacio	Fotografías
<p>PROCESO CONSTRUCTIVO</p> <p>La Sacristía de la Santa Iglesia Catedral de la Asunción de Jaén, de estilo renacentista, se extiende perpendicularmente al eje de la sala capitular de la catedral, sobre el antiguo «panteón de los canónigos», actualmente museo de la catedral (Fig. 1). Este espacio tiene acceso desde el crucero de la parte del Evangelio, ante la puerta Sur, entre las capillas de la Virgen de las Angustias y de la Virgen de los Dolores.</p> <p>Su construcción, iniciada en el año 1555, cuando se demuele el último resto de la muralla de la medina islámica, fue proyectada y dirigida por Andrés de Vandelvira, hasta la fecha de su muerte en 1575. Dos años después concluyeron las obras de esta joya arquitectónica, considerada una de las piezas más importantes del renacimiento español.</p> <p>DESCRIPCIÓN DEL INTERIOR</p> <p>La sala tiene planta rectangular de unos 22 por 12 metros. Los paramentos están realizados mediante arcadas formadas por arcos de medio punto que alternan sus tamaños, entre los que se ubican las enormes cajoneras en las que están guardados los ternos del culto y las vestimentas que se emplean en las liturgias.</p> <p>El interior cuenta con 80 columnas corintias, de las cuales 36 son exentas y 44 semi-adosadas, todas agrupadas en cuatro, sobre 18 pedestales de los que parten las arcadas. Sobre ellas corre el capitel y la cornisa. En la parte superior tiene una doble arquería con cubierta de bóveda de medio cañón, decorada con figuras geométricas de círculos y rectángulos (Fig. 2). El muro derecho (Fig. 3) cuenta con 5 ventanas entre los intercolumnios, que le proporcionan luz natural. En el resto de los paramentos, ese espacio está ocupado por lienzos y pinturas murales, concretamente sobre la puerta de ingreso, se encuentra una pintura de la Magdalena penitente (Fig. 4).</p>	 <p>Figura 1. Vista exterior desde c/ Almenas.</p>  <p>Figura 2. Vista interior.</p>  <p>Figura 3. Vista interior del muro derecho.</p>

Descripción del espacio	Fotografías
<p>Además, apoyado en la cabecera central hay un retablo-relicario de Alonso de Mena de principios del XVII (Fig. 5).</p> <p>REVESTIMIENTO Y MOBILIARIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros, bóveda y cúpulas de piedra. - Solería de cerámica. - Pilares y columnas de piedra. - Portones interiores de madera de pino. - Ventanas ligeras. - Grandes cajoneras de madera. - Bancos de madera acolchados. 	 <p>Figura 4. Vista interior, muro de acceso a la Sacristía.</p>  <p>Figura 5. Vista interior, cabecera.</p>

Tabla 1. Datos geométricos del espacio.

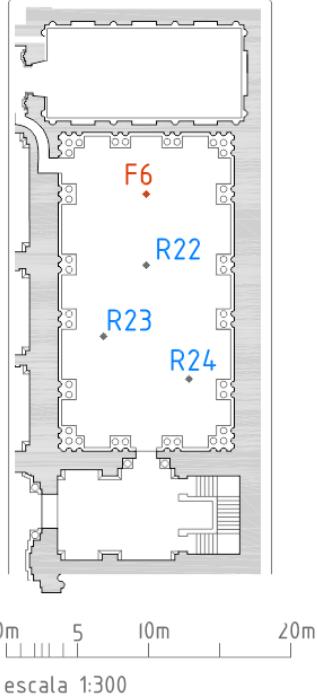
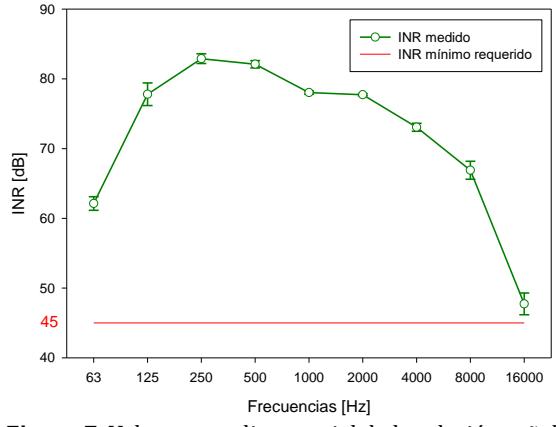
Volumen	Dimensiones máximas del espacio (Sacristía)			Naves	Capillas
	Altura	Longitud	Anchura		
$\approx 3.650 \text{ m}^3$	16	22 m	12 m	1	-

Medición acústica**Tabla 2.** Resumen de posiciones de la fuente y receptores caracterizados.

Posición de la fuente	F6
Ubicación de la fuente	Cabecera
Número total de receptores caracterizados	3
Receptores con Sonido Directo	R22 R23 R24
Receptores sin Sonido Directo	-

Nota:

La caracterización en cada punto receptor requiere la emisión de cuatro señales excitadoras para registrar tanto las respuestas al impulso monoaurales (omnidireccional, figura-de-ocho y B-format) como binaurales, concretamente se midieron un total de 8 respuestas impulsivas por punto.

Medición acústica																								
DATOS DE SESIÓN DE MEDIDAS																								
<p>Para caracterizar el comportamiento acústico del espacio, se han obtenido las respuestas impulsivas (RI) siguiendo la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Debido a las pequeñas dimensiones del espacio, se ha considerado 1 sola posición de la fuente, que se corresponde con la ubicación posible del foco sonoro en el uso habitual del recinto. Se fijaron un total de 3 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia (Fig. 6).</p>																								
Tabla 3. Datos principales de la sesión de medidas.	<table border="1"> <tr> <td>Norma aplicada</td><td>UNE-EN-ISO 3382-1:2010</td></tr> <tr> <td>Fecha</td><td>22/04/2013</td></tr> <tr> <td>Condiciones ambientales (T^a / Humedad relativa)</td><td>16,5-17°C / 60-70%</td></tr> <tr> <td>Nivel de ocupación</td><td>Desocupado</td></tr> <tr> <td>Nº de posiciones de fuente (h_F = 1,50 m)</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Nº de receptores (h_R = 1,20 m)</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Señal de excitación</td><td> Tipo: Barrido exponencial sinusoidal Duración: 30 s Rango de frecuencia: 63 – 16000 Hz </td></tr> </table>	Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010	Fecha	22/04/2013	Condiciones ambientales (T^a / Humedad relativa)	16,5-17°C / 60-70%	Nivel de ocupación	Desocupado	Nº de posiciones de fuente (h_F = 1,50 m)	1	Nº de receptores (h_R = 1,20 m)	3	Señal de excitación	Tipo: Barrido exponencial sinusoidal Duración: 30 s Rango de frecuencia: 63 – 16000 Hz									
Norma aplicada	UNE-EN-ISO 3382-1:2010																							
Fecha	22/04/2013																							
Condiciones ambientales (T^a / Humedad relativa)	16,5-17°C / 60-70%																							
Nivel de ocupación	Desocupado																							
Nº de posiciones de fuente (h_F = 1,50 m)	1																							
Nº de receptores (h_R = 1,20 m)	3																							
Señal de excitación	Tipo: Barrido exponencial sinusoidal Duración: 30 s Rango de frecuencia: 63 – 16000 Hz																							
EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN	<p>El proceso de generación y adquisición de la señal se ha llevado a cabo con el programa WinMLS2004, usando la tarjeta de sonido EDIROL UA-101 de 8 canales. La señal de excitación se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K tipo 2734, junto con un subwoofer Behringer Eurolive B1800D Pro. Las RIIs monoaurales se capturaron con dos tipos de micrófonos: el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización SoundField SMP200; y el micrófono de patrón B-format MKV de SoundField. Las respuestas al impulso binaurales se registraron usando la cabeza binaural Head Acoustic. Las señales han sido analizadas y procesadas con el mismo software.</p> <p>La relación señal/ruido impulsiva obtenida en cada respuesta al impulso superó los 45 dB en todas las bandas de frecuencias de interés, incluso en los puntos receptores más alejados de la fuente (ver Figura 7). Establecer un tiempo de barrido adecuado y un nivel de emisión que garantice una INR suficiente, permite obtener una RI válida, con caídas limpias en la integral de Schroeder.</p>																							
																								
	Figura 6. Planta de la sacristía con las posiciones de la fuente (F) y los puntos receptores (R).																							
	Figura 7. Valor promedio espacial de la relación señal/ruido impulsiva.																							
	Tabla 4. Valores espectrales de la relación señal ruido impulsiva (INR [dB]) promediados espacialmente y su dispersión valorada por el error estándar, para cada posición de la fuente.																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frec.[Hz]</th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1000</th><th>2000</th><th>4000</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F6</td><td>INR</td><td>77,8</td><td>82,9</td><td>82,1</td><td>78,0</td><td>77,7</td><td>73,1</td></tr> <tr> <td></td><td>EE</td><td>2,82</td><td>1,22</td><td>0,92</td><td>0,40</td><td>0,25</td><td>0,98</td></tr> </tbody> </table>	Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	F6	INR	77,8	82,9	82,1	78,0	77,7	73,1		EE	2,82	1,22	0,92	0,40	0,25	0,98
Frec.[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000																		
F6	INR	77,8	82,9	82,1	78,0	77,7	73,1																	
	EE	2,82	1,22	0,92	0,40	0,25	0,98																	

Parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente	
Posición de fuente	F6
Ubicación de fuente	Cabecera
T_{30m} [s]	4,98
EDT_m [s]	4,81
T_{Sm} [ms]	341,50
C_{50m} [dB]	-7,33
C_{80m} [dB]	-5,38
D_{50m}	0,17
G_m [dB]	8,15
$L_{J,avg}$ [dB]	3,06
J_{LFm}	0,23
BR^b	1,22
B_r^b	0,66
IACC_{Em}	0,35
IACC_{Lm}	0,10
IACC_{Am}	0,16
RASTI^b	0,32
STI^b	0,38

Tabla 5. Parámetros acústicos promediados^a espacial y espectralmente.

Posición de fuente	F6
Ubicación de fuente	Cabecera
T_{30m} [s]	4,98
EDT_m [s]	4,81
T_{Sm} [ms]	341,50
C_{50m} [dB]	-7,33
C_{80m} [dB]	-5,38
D_{50m}	0,17
G_m [dB]	8,15
$L_{J,avg}$ [dB]	3,06
J_{LFm}	0,23
BR^b	1,22
B_r^b	0,66
IACC_{Em}	0,35
IACC_{Lm}	0,10
IACC_{Am}	0,16
RASTI^b	0,32
STI^b	0,38

^a Promediados aritméticamente para las bandas de octava indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010, excepto para L_J , que se promedia energéticamente. El IACC se promedia según Okano et al.

^b Estos parámetros no aparecen recogidos en la Norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Los índices RASTI y STI fueron calculados a partir de la respuesta al impulso, sin considerar el ruido de fondo.

Comportamiento espectral de los parámetros acústicos promediados espacialmente																																							
Parámetros de reverberación																																							
Tabla 6. Valores espectrales del tiempo de reverberación (T_{30} [s]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE).																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1000</th><th>2000</th><th>4000</th><th>T_{30m}</th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F6</td><td>M</td><td>6,11</td><td>6,03</td><td>5,36</td><td>4,61</td><td>3,73</td><td>2,81</td><td>4,98</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>EE</td><td>0,08</td><td>0,01</td><td>0,05</td><td>0,01</td><td>0,01</td><td>0,01</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>												125	250	500	1000	2000	4000	T_{30m}		F6	M	6,11	6,03	5,36	4,61	3,73	2,81	4,98			EE	0,08	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01		
		125	250	500	1000	2000	4000	T_{30m}																															
F6	M	6,11	6,03	5,36	4,61	3,73	2,81	4,98																															
	EE	0,08	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01																																
Tabla 7. Valores espectrales del tiempo de reverberación inicial (EDT [s]) promediados espacialmente y dispersión de los mismos valorada por el error estándar.																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1000</th><th>2000</th><th>4000</th><th>EDT_m</th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F6</td><td>M</td><td>6,33</td><td>5,83</td><td>5,11</td><td>4,52</td><td>3,60</td><td>2,55</td><td>4,81</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>EE</td><td>0,12</td><td>0,05</td><td>0,16</td><td>0,01</td><td>0,04</td><td>0,06</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>												125	250	500	1000	2000	4000	EDT _m		F6	M	6,33	5,83	5,11	4,52	3,60	2,55	4,81			EE	0,12	0,05	0,16	0,01	0,04	0,06		
		125	250	500	1000	2000	4000	EDT _m																															
F6	M	6,33	5,83	5,11	4,52	3,60	2,55	4,81																															
	EE	0,12	0,05	0,16	0,01	0,04	0,06																																
Parámetros de nivel sonoro																																							
Tabla 8. Valores espectrales de la fuerza sonora (G [dB]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE).																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1000</th><th>2000</th><th>4000</th><th>G_m</th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F6</td><td>M</td><td>10,80</td><td>12,47</td><td>7,37</td><td>8,93</td><td>8,33</td><td>8,20</td><td>8,15</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>EE</td><td>0,30</td><td>0,43</td><td>0,61</td><td>0,38</td><td>0,58</td><td>0,78</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>												125	250	500	1000	2000	4000	G_m		F6	M	10,80	12,47	7,37	8,93	8,33	8,20	8,15			EE	0,30	0,43	0,61	0,38	0,58	0,78		
		125	250	500	1000	2000	4000	G_m																															
F6	M	10,80	12,47	7,37	8,93	8,33	8,20	8,15																															
	EE	0,30	0,43	0,61	0,38	0,58	0,78																																
Figura 8. Comportamiento espectral de los parámetros de reverberación, promediados espacialmente.																																							
Figura 9. Comportamiento espectral de los parámetros de nivel sonoro, promediados espacialmente.																																							

Comportamiento espectral de los parámetros acústicos promediados espacialmente

Parámetros de claridad del sonido

Tabla 9. Valores espectrales del tiempo central (T_S [ms]) promediados espacialmente (M) y dispersión de los mismos valorada por el error estándar (EE).

		125	250	500	1000	2000	4000	T_{Sm}
F6	M	384,0	405,3	371,0	312,0	236,0	166,0	341,5
	EE	20,03	7,69	35,10	16,56	24,01	23,12	

Tabla 10. Valores espectrales de la claridad (C_{80} [dB]) promediados espacialmente y dispersión de los mismos valorada por el error estándar.

		125	250	500	1000	2000	4000	C_{80m}
F6	M	-4,00	-5,57	-6,10	-4,67	-2,93	-1,67	-5,38
	EE	1,14	0,12	1,46	0,88	1,27	1,41	

Tabla 11. Valores espectrales de la definición (D_{50}) promediados espacialmente y dispersión de los mismos valorada por el error estándar.

		125	250	500	1000	2000	4000	D_{50m}
F6	M	0,24	0,16	0,15	0,18	0,27	0,31	0,17
	EE	0,04	0,01	0,06	0,04	0,07	0,08	

Frecuencias [Hz]	T_S [ms]
125	384,0
250	405,3
500	371,0
1000	312,0
2000	236,0
4000	166,0

Frecuencias [Hz]	C_{80} [dB]
125	-4,00
250	-5,57
500	-6,10
1000	-4,67
2000	-2,93
4000	-1,67

Frecuencias [Hz]	D_{50}
125	0,24
250	0,16
500	0,15
1000	0,18
2000	0,27
4000	0,31

Figura 10. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente.

Figura 10. Comportamiento espectral de los parámetros de claridad del sonido, promediados espacialmente.

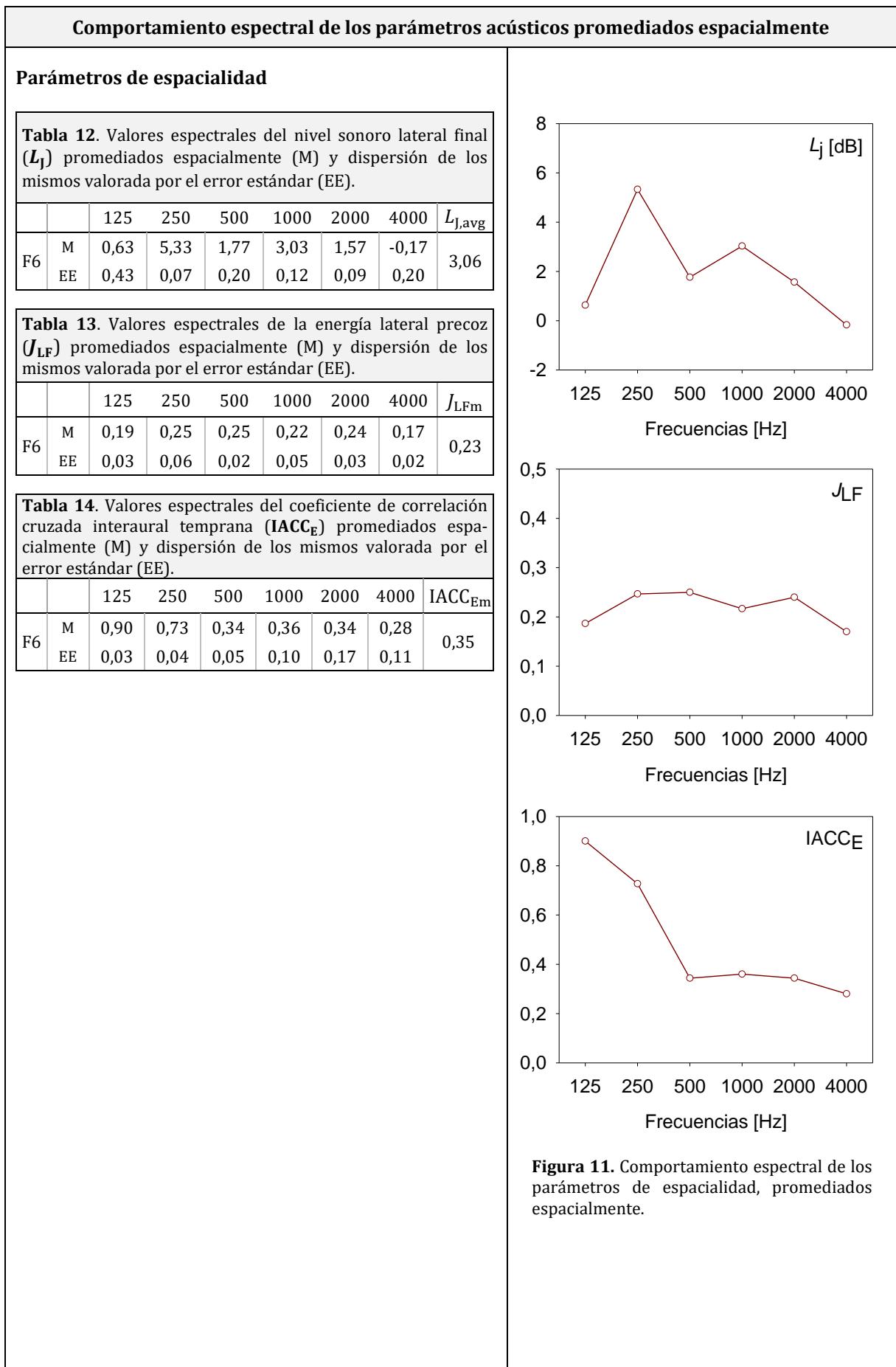
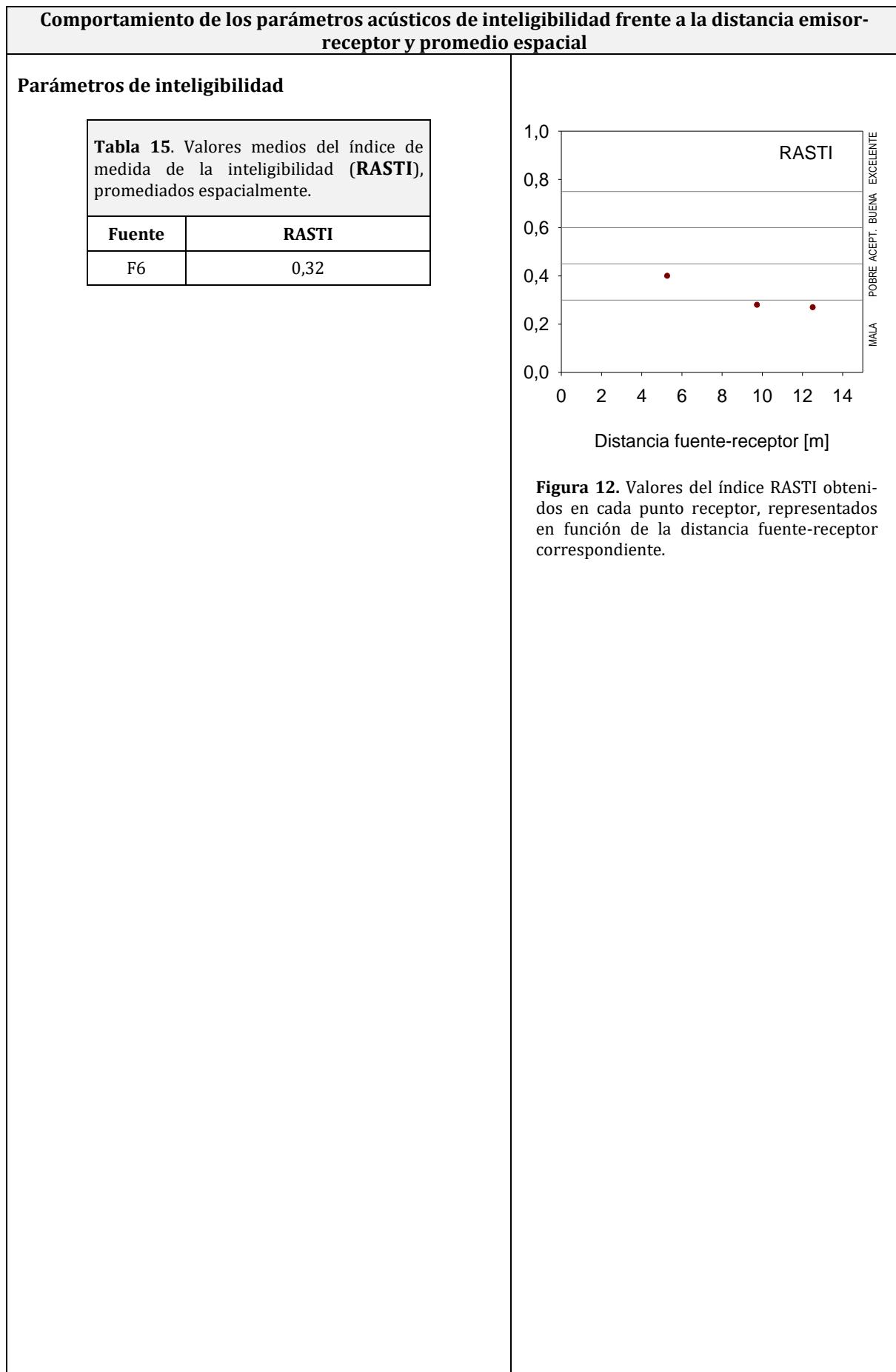


Figura 11. Comportamiento espectral de los parámetros de espacialidad, promediados espacialmente.



PROYECTO BIHA2010-20523:

*La Acústica de las Catedrales:
Una Aportación Científica para la Recuperación del Patrimonio Cultural*



CONFIGURACIONES DE LA CADENA DE MEDIDA USADAS EN LAS CATEDRALES ANDALUZAS

Configuración	Software	Fuente	Subwoofer	Micrófonos	Fuente de polarización	Tarjeta sonido	Amplificador de potencia	Cableado	Datos ambientales	Catedral / fuente
CONFIG. 1	WinMLS 2004	AVM DO-12	no	AT4050/CM5	Earthworks (26 dB)	EDIROL UA-101	B&K 2734 (0/-18 dB)	Cable largo	15°C/80%	Sevilla / F1, F3
CONFIG. 3	"	"	no	"	"	"	B&K 2734 (0/-12 dB)	Cable 100m	13,1°C/80%	Sevilla / F2, F4
CONFIG. 5	"	"	no	"	"	"	B&K 2734 (0/-18 dB)	"	"	Sevilla / F5
CONFIG. 7	"	"	3 izqda.	"	"	"	"	"	"	Málaga / F1-F3, F5
CONFIG. 9 *	"	"	no	"	"	"	"	"	"	Málaga / F4
CONFIG. 11	"	"	3 izqda	"	SoundField (20 dB)	"	"	"	"	Córdoba / F1, F3
CONFIG. 13	"	"	2 izqda	"	"	"	"	"	"	Córdoba / F2, F4-F6
CONFIG. 15	"	"	3 izqda	"	SoundField (16 dB)	"	B&K 2734 (0/-12 dB)	"	13,9°C/80%	Cádiz / F1-F4 Jaén / F1-F3, F5 Granada / F1, F2
CONFIG. 17	"	"	no	"	"	"	"	"	"	Cádiz / F5 Jaén / F4, F6 Granada / F3
CONFIG. 19	EASERA	"	4 izqda	"	"	"	B&K 2734 (-10/-24 dB)	"	"	Cripta Cádiz / F1, F2

*CONFIG. 9 = CONFIG. 5

NOTA: Medidas de calibración de nivel realizadas en campo libre (distancia F-R = 5 m): **Parque el Majuelo, La Rinconada, Sevilla.**

Appendix 2:

Initial 3D models created to simulate the acoustics of large places of worship

(Forum Acusticum 2011, ISVA 2011, TecniAcústica 2012, and TecniAcústica 2013)

This appendix includes the work published regarding the initial simulation models of the cathedrals of Malaga, Seville and Jaen, created as part of the national research project *Acoustics of cathedrals: a scientific contribution for the recovery of cultural heritage* (BIA2010 20523). All of these models were designed and calibrated according to the initial procedure described in *Chapter 3*. At this initial stage, only the main position of the sound source in these spaces, which is located in the centre of the high altar, was considered. Despite the acceptable agreement between experimental and simulated results obtained with the initial models presented here, a more exhaustive analysis was necessary to ensure the accuracy of the simulated impulse responses for the rest of the source-receiver combinations characterised during the measurement sessions. Moreover, the initial models had to be refined in order to further improve the quality of the simulations, to make them suitable for their application to specific research: the effect of changes in occupancy conditions and/or source/receiver configurations; the acoustic impact of possible interventions on the enclosure; the recreation of the acoustic environment of ancient times as well as for the analyses of their acoustic transformation throughout their history; and the generation of high-quality auralizations.

A conference publication regarding the Pantheon of Rome is also included. In this case, the study strove to analyse the incidence of the architectural design of the rotunda and the dome on the acoustic behaviour of this emblematic space by using simulation techniques.



Virtual Acoustics of the Cathedral of Malaga (Spain)

L. Álvarez, A. Alonso, T. Zamarreño, S. Girón, and M. Galindo.

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes, 2, E. T. S. de Arquitectura, 41012 Sevilla, Spain.

Summary

The Catholic Cathedral of Malaga (southern Spain), located in the historical centre, is the most emblematic building of the city. Its construction began in 1528 and was completed in 1782, suffering several interruptions and modifications at the hands of various architects, and hence various architectural styles are superimposed: the interior is Renaissance and the façade is predominantly Baroque. Rectangular in shape, it has three naves of the same height, with the central nave being the widest. In this work, a 3D model of this ecclesiastical space is created in order to carry out an acoustic simulation of its sound field by using the simulation algorithms of CATT Acoustic software implemented in the new TUCT calculation motor (The Universal Cone Tracer). The virtual model created is calibrated through an iterative process of adjustment of reverberation times simulated in such a way that they differ by no more than 5% from those measured. These measured values were obtained from the impulse responses monitored in situ. Likewise, a comparison of the experimental and simulated results of other acoustic parameters in terms of their just noticeable differences (JND) was also carried out, which supports the reliability of the computational acoustic model implemented. This work is the starting point of a multidisciplinary project which aims to incorporate the acoustic aspects within the heritage value of Andalusian cathedrals.

PACS no. 43.55.Gx, 43.55.ka

1. Introduction

Computational models [1] based on geometric acoustics first appeared in around 1967, and since the early 90s they have succeeded in attaining results ever closer to the true acoustic conditions of a closed enclosure. Thanks to improvements in both the calculation speed of hardware and in equipment technology, and to the appearance of new software, these techniques currently provide highly reliable results despite the limitations commonly associated with geometric models. The latest improvements include algorithms capable of producing auralizations of high quality [2]. The general computational base is the raytracing technique, whose accuracy requires the detailed description of the full acoustic properties of the surfaces. Various algorithms have been developed to implement the propagation of the acoustic energy inside an enclosure by using raytracing

techniques. In particular, the algorithm of raytracing [3] is based on the trace and pursuit of the sound rays from a point of the enclosure that acts as the source, up to the reception point, by following the laws of geometric optics, and takes up to a certain order of reflections into account. The method has since been further developed and the path of each ray has become a circular cone [4], or pyramidal with a triangular base [5]. The algorithm of the image sources is used to generate an echogram by bearing in mind the intensity associated to each reflection and the time of arrival in relation to the direct sound. When arbitrary surfaces exist then the number of possible images increases exponentially with the reflection order, resulting in a complicated model, as occurs in concert halls. In 1989, Vorländer [6] presented the first hybrid algorithm in an attempt to combine the advantages of previous algorithms and to limit the incidence of their drawbacks. This technique has been applied successfully by some authors in different types of buildings, particularly in Catholic churches [7, 8].



Figure 1. Aerial view of the Cathedral of Malaga.

This work focuses on the presentation of the calibrated and validated computational model created from the interior space of Malaga Cathedral, as the first results of an interdisciplinary research project which aims to conduct a detailed acoustic study of the main cathedrals of the region (Andalusia). This scientific knowledge will constitute a new contribution to the rich heritage of these buildings, by incorporating the acoustic assessment compared to the traditional stylistic-functional vision, recognized as Intangible Heritage.

2. Description of the Cathedral

Located in the historical centre, the Catholic Cathedral of Malaga (southern Spain) [9], is the most emblematic building of the city. Its construction lasted from 1528 when work was initiated on the principal mosque in the Islamic city at the time, until 1782, ending a long building process caught up in constant interruptions and modifications under the direction of different architects, and hence various architectural styles are superimposed on the building: the interior is Renaissance and the façade is predominantly Baroque. Although it was designed with two towers, only one tower was actually built (see Figure 1).

The interior of the cathedral is of Renaissance style: a basilica ground plan (rectangular) with three naves of the same height, with the central nave the widest. The entire temple is supported by large pillars covered by columns with a capital from which new pillars with pilasters emerge that support a network of semicircular domes. The height of these domes is approximately 42 m from the floor. Light penetrates the interior by the triple arches open at the height of the second body



Figure 2. Interior view of the main altar.

through the windows and also through the chapel windows.

The presbytery located in the apse of the temple is raised and surrounded by walls cut by high windows between fluted Corinthian columns and topped with a beautiful ribbed vault. The pulpits, made of marble, are placed near the high altar. In the lateral spaces of the naves and around the apse there are chapels, each of which boasts its own altar.

The choir is situated in the centre of the temple flanked by two large organs, furnished with wooden seating carved by Pedro de Mena, and with various altars with wooden and marble sculptures. The ground plan of the cathedral (Figure 3) shows the location of the most important places mentioned, plus the chapels, and the positions for the reception of the microphones (19 in total) and for the sound source (S) for the acoustic measurements and simulations.

The cathedral has white and red jasper marble flooring. The columns supporting the lower and upper galleries are of limestone, and the domes and the chapel walls are made of stone. The inner doors in the transept are made of pine. The presbytery is carpeted and there are wooden pews and plastic chairs in the congregational seating zones (Figure 3).

3. Experimental technique

The procedures employed here are those established in the ISO 3382-1 standard [10] and measurements were carried out in the unoccupied temple. Temperature and relative humidity were monitored while measurements were taken by a precision electronic thermo-hygrometer.

The impulse responses (IR) were obtained at each reception point using sine sweep signals which were generated and analysed by the EASERA [11]

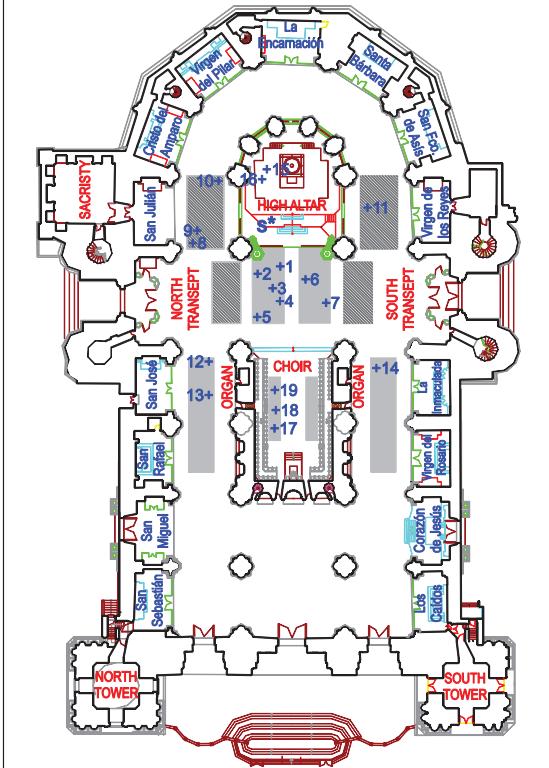


Figure 3. Ground plan of the Cathedral showing the pew (grey) and chair (dashed grey) zones for the congregation and the positions of the source (S) and microphone.

software via the sound card Roland Edirol UA-25EX. The omnidirectional source, a Rivas RSAN-AG dodecahedral loudspeaker with a Behringer Europower EP2500 amplifier, is placed at the most usual point of location of the natural source (S) in the high altar at a height of 1.70 m from the floor. The omnidirectional microphone Audix TR40 captured the sound signals and was located at the approximate height of the ears of a seated person, 1.20 m from the floor, at a predetermined number of positions (numbered from 1 to 19) in the congregational zones (see Figure 3).

These monaural IRs were measured to determine the following acoustic parameters for each frequency octave band between 125 Hz to 4000 Hz and in all receiver positions: reverberation times (T_{20}), early decay time (EDT), centre time (T_s), clarity (C_{80}), and definition (D_{50}).

4. Acoustic simulation

The software used for the acoustic simulation is CATT-Acoustic [12]. The full detailed calculation

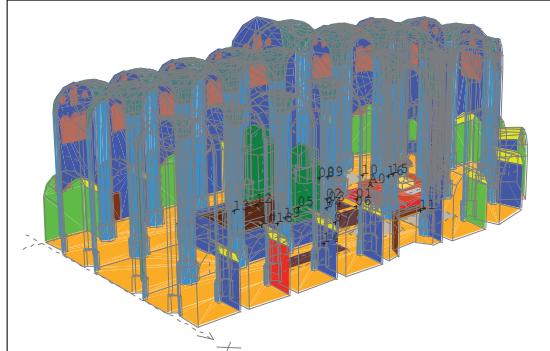


Figure 4. Geometrical 3D model created to simulate the acoustics of the cathedral.

makes use of the Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC) algorithm with statistical corrections of the tail. This prediction method enables the calculation of numeric values for room acoustic parameters and the production of an echogram which can be used in the auralization processes. To mitigate the inconveniences of the method, the direct sound, the first-order specular and diffuse reflections, and the specular reflections of second order are handled in a deterministic way by the image source method. For the simulation carried out by CATT, the number of rays were determined automatically (85,148 rays) and a ray truncation time of 8 seconds was set.

Other acoustic calculations were carried out by using the TUCT (The Universal Cone Tracer) [13] motor where the acoustic parameters were obtained through processing echograms (E) and by processing the impulse response (h) algorithms. Specifically, the algorithm for closed-room "short calculation, basic auralization" with a "max split order" 1 was used, which determined the number of rays per cone automatically (206,061) for parameter calculation, and set the length of the impulse response at 8 seconds.

Figure 4 depicts the geometrical 3D model implemented for the cathedral with 3,463 planes, an approximate total volume of 118,500 m³ and a surface of 27,190 m². Table I shows the absorption coefficients from 125 to 4000 Hz octave bands associated to materials whose relative surface is greater than 0.8%, in addition to their colours assigned in the geometric three-dimensional model of Figure 4 and their references.

Likewise, flat or scarcely decorated surfaces are assigned scattering coefficients varying from 0.12 at 125 Hz to 0.17 at 4000 Hz, which include a linear increase of 0.01 to account for frequency

dependence. Shallow decorated surfaces are assigned higher scattering coefficients varying linearly from 0.20 at 125 Hz to 0.40 at 4000 Hz. Finally, pews, sculptures, and coffered vaults are assigned scattering coefficients varying from 0.30 at 125 Hz up to 0.80 at 4000 Hz [7].

The simulations undertaken use a calibration process based on an adjustment of the values of absorption coefficients of columns and stone walls of the cathedral such that the spatially averaged simulated reverberation times differ, on average, by no more than 5% from those measured on site, which are spatially averaged in the main congregational zones (pew and chair zones) (Table II). The limit for these differences is based on the just noticeable difference (JND), for which a value of 5% is widely accepted [10]. Since CATT-Acoustic offers the possibility of evaluating the values of these reverberation times in an interactive way based on classic formulae, the adjustment procedure does not necessarily require a complete simulation in the first stages.

5. Results and discussion

Figure 5(a) and (b) shows a comparison of the spectral behaviour in octave bands of spatially averaged values in the congregational areas, (reception points where direct sound failed to reach and those inside the reverberation radius are omitted) of EDT, and D_{50} parameters, respectively. Their error bars are also plotted which take into account the spatial dispersion of the various receivers through standard deviation. For the sake of clarity, the error bars of the simulation by TUCT, which are of the same order as those of

Table II. Spatially averaged measured reverberation time (T_{av}) used in the calibration of the model and adjusted values (T_{adj}).

Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{av} (s)	7.93	7.41	7.32	6.54	4.94	3.48
T_{adj} (s)	7.99	7.56	7.41	6.72	5.08	3.32

CATT results, are omitted. It is worth highlighting the good agreement between the predicted results from any of the three algorithms of calculation of the acoustic parameters, and the acceptable concordance between experimental values on site and the simulations, particularly the results of the EDT parameter which are notoriously difficult to predict and where the dispersion is mainly at low frequencies. A further quantitative analysis of the discrepancies between the actual and virtual values of the acoustic parameters is outlined below.

Regarding the behaviour of the acoustic parameters in the 1 kHz band as a function of source-receiver distance, Figure 6(a) and (b) depicts the comparison between measured and simulated results (CATT results), for T_s and C_{80} , respectively. As a standard reference, the curves predicted by Barron's hypothesis of sound propagation [15] are superimposed. The plotted graphs indicate an acceptable agreement between experimental and simulated values at the various reception points and that the two set of results follow the trend marked by Barron's theoretical predictions within the range of source-receiver distances shown. At greater distances, higher deviations are expected.

To complete the analysis, Figure 7 shows the absolute differences between measured and simulated values for the reception points in the

Table I. Absorption coefficients and colour code of the materials for the simulations at the various frequencies.

Material	Fractional Area (%)	Colour code	Absorption coefficients				
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
Columns*	24.6		0.16	0.18	0.16	0.16	0.17
Stone walls*	24.2		0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
Domes and arches, [7]	18.0		0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
Marble floor, [2]	11.2		0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Altarpieces in chapels, [7]	5.2		0.12	0.12	0.15	0.15	0.18
Chapels, [7]	4.6		0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
Stained-glass windows, [14]	4.0		0.35	0.25	0.18	0.12	0.07
Organ (estimated)	2.0		0.12	0.14	0.16	0.16	0.16
Wooden pews, [2]	1.3		0.10	0.15	0.18	0.20	0.20
Choir seating, [7]	1.1		0.12	0.12	0.15	0.15	0.18
Doors, [2]	1.0		0.14	0.10	0.06	0.08	0.10
Plastic chairs, [2]	0.8		0.06	0.10	0.10	0.20	0.30

(*) Adapted from the experimental results.

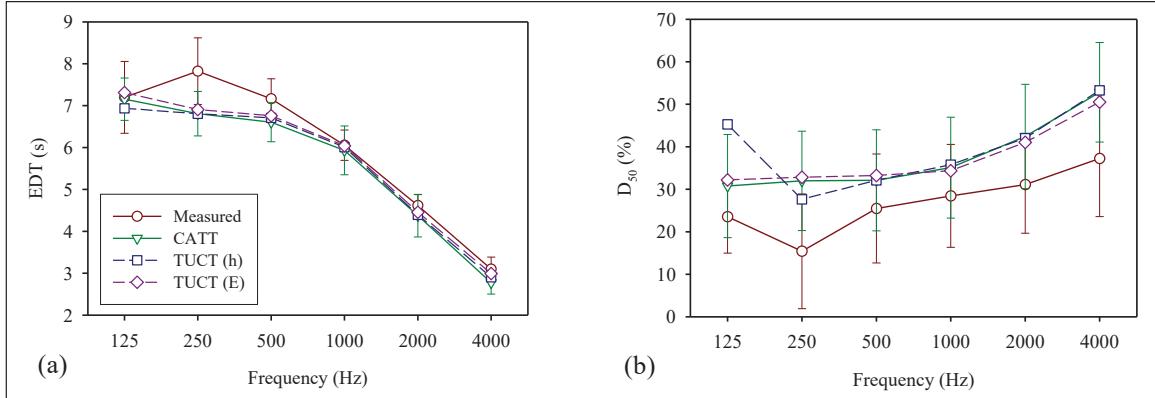


Figure 5. Spatially averaged results of EDT (a), and D_{50} (b) parameters, both measured and simulated with the different algorithms for each octave band. The vertical bars indicate the spatial dispersion of the parameters by means of SD.

cathedral and for each acoustic parameter in the six frequency octave bands. Accuracy between the two sets of values is within the range of 1-2 times the JNDs [8]. According to Martellotta [16], for enclosures with longer reverberation times, the JND for T_s should be 8.5% of the reference value, and for C_{80} , 1.5 dB. The greatest failures occur at low and high frequencies for all the acoustic parameters. Nevertheless, it can be seen that the range of accuracy includes the majority of the reception points, thereby supporting the validity and reliability of the simulation and the methodology.

6. Conclusions

Three separate prediction models are used for the computer simulation. The results from the model shown are presented here, which, due to its geometrical simplicity, enables values to be

reached that are more consistent with the experimental results in the calibration process.

The three geometric prediction algorithms used in this study (CATT, TUCT (h) and TUCT (E)) lead to very similar results to those of the model implemented and to an acceptable correspondence with the values measured on site, both in terms of the spectral behaviour and in its dependence on source-receiver distance. From the study of the absolute differences of the acoustic parameters analysed at each microphone position and for each frequency, it can be inferred that, within the range of accuracy of the simulation which includes 1-2 times the JNDs, the majority of the receiving points are included.

Despite the good agreement between experimental and simulated results, more exhaustive on-site measurements are needed which involve additional acoustic descriptors, such as those related to spatial impression, and further positions of the

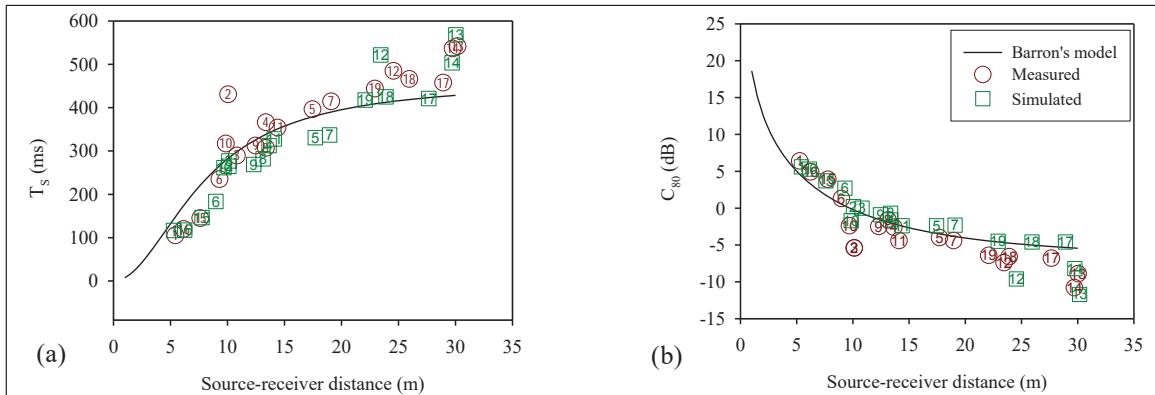


Figure 6. Results of T_s (a), and C_{80} (b) parameters, in the 1 kHz band, both measured and simulated with CATT versus source-receiver distance. The theoretical expected values according to Barron's model and the reception points are also shown.

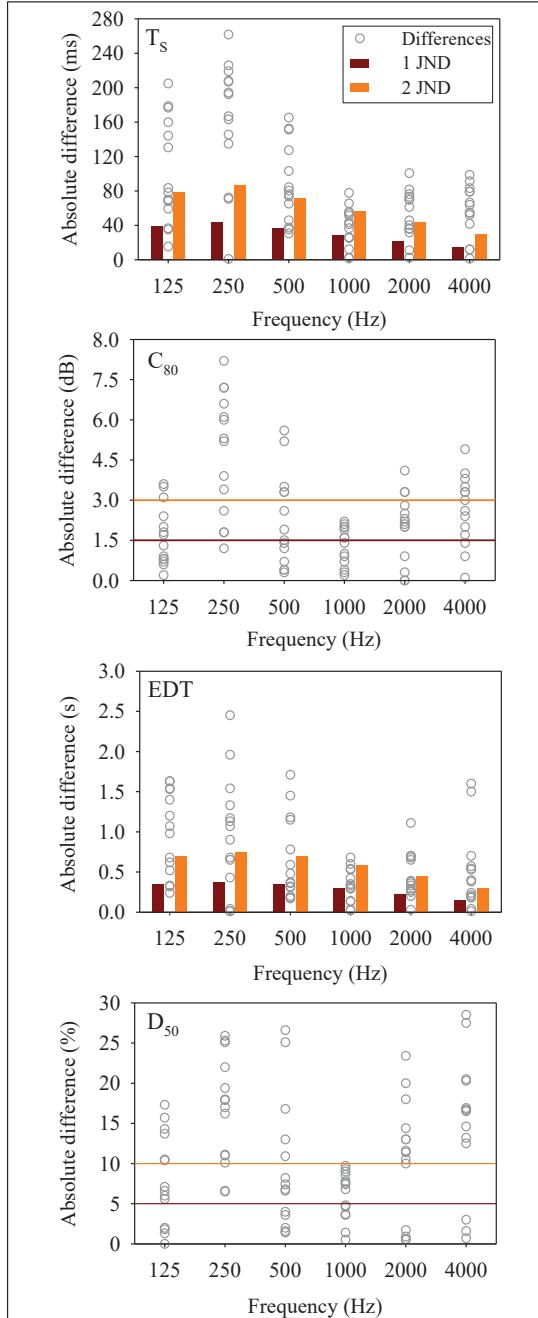


Figure 7. Absolute differences between measured and CATT-simulated results for the reception points, in the various octave bands, for each acoustic parameter. Two limits as a function of JND are indicated.

source and receiver are required in order to cover the entire ecclesial space. A new measurement campaign is currently being conducted which includes such aspects.

Acknowledgements

The authors wish to express their appreciation for the valuable loan of the EASERA equipment from the department of Communication Engineering of the University of Málaga, and also to thank the Dean of the cathedral for allowing measurements to be carried out. This work has been financially supported by FEDER funds and the Spanish Ministry of Science and Innovation, with reference BIA2010-20523.

References

- [1] J. H. Rindel: The use of computer modelling in room acoustics. *J. Vib. Eng.* 3 (2000) 219-224.
- [2] M. Vorländer: Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [3] A. Krockstadt, S. Ström, S. Sörsdal: Calculating the acoustical room response by the use of a ray-tracing technique. *J. Sound Vib.* 8 (1968) 118-125.
- [4] I. A. Drumm, Y. W. Lam: The adaptive beam-tracing algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2000) 1405-1412.
- [5] T. A. Lewers: Combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Appl. Acoust.* 38 (1993) 161-178.
- [6] M. Vorländer: Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.* 86 (1989) 172-178.
- [7] F. Martellotta: Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (2009) 1175-1186.
- [8] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón: Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (2009) 1207-1218.
- [9] T. Sauret: La catedral de Málaga (in Spanish). Servicio de publicaciones de la diputación, Málaga, 2003.
- [10] International Organization for Standardization ISO 3382-1:2009(E): Acoustics-Measurement of room acoustic parameters. Performance rooms. Geneva, Switzerland, 2009.
- [11] EASERA Tutorial v1.1. Software Design Ahnert GmbH, Berlin, 2006.
- [12] B-I. Dalenbäck: CATT-Acoustic v8 user's manual. CAT Technique, Gothenburg, Sweden, 2007.
- [13] B-I. Dalenbäck: CATT TUCT v1.0 user's manual. CAT Technique, Gothenburg, Sweden, 2010.
- [14] T. J. Cox, P. D'Antonio: Acoustic absorber and diffusers, theory, design and application. Spon, London, 2004.
- [15] T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo: Acoustic energy relations in Mudéjar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (2007) 234-250.
- [16] F. Martellotta: The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (2010) 654-663.



INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka

Álvarez, Lidia; Alonso, Alicia; Galindo, Miguel; Zamarreño, Teófilo; Girón, Sara

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes, 2, E. T. S. de Arquitectura, 41012 Sevilla, SPAIN.
calvarez6@us.es, aliciaalonso@us.es, mgalindo@us.es, teofilo@us.es, sajiron@us.es

ABSTRACT

The cathedral of Seville is one of the most emblematic heritage buildings of the city, world heritage and the largest gothic cathedral in the world. It is divided into 5 naves; the central nave contains the choir and the main chapel, and in the outer naves, chapels open along its entire contour. In this work, a 3D model of this liturgical space has been created in order to simulate the sound field. The virtual model created is calibrated, from experimental measurements of T30, through an iterative process. From this point, the simulated and measured results for the rest of the commonly used acoustic parameters are analysed.

RESUMEN

La catedral de Sevilla es uno de los edificios patrimoniales más emblemáticos de la ciudad, patrimonio de la humanidad, y la mayor catedral gótica del mundo. Se articula en 5 naves; la central alberga el coro y la capilla mayor, y en las exteriores se abren capillas en todo su contorno. En este trabajo se elabora un modelo 3D de este espacio litúrgico para simular el campo sonoro. El modelo virtual creado se calibra, a partir de las medidas experimentales de T30, mediante un proceso iterativo. A partir de ahí se analizan los resultados simulados y medidos del resto de los parámetros acústicos habituales.

INTRODUCCIÓN

Aunque la propagación del sonido en los recintos existentes o concebidos para la presentación de la música sinfónica ha constituido el objetivo primordial de la acústica de salas y de la práctica acústica de las últimas décadas [1], también las propiedades acústicas de los espacios religiosos han recibido gran atención en la comunidad científica internacional [2]. El interés está tanto en los edificios contemporáneos de culto, en los que se cuida la inteligibilidad del mensaje entre celebrante y los fieles [3], y que se han concebido con un cierto carácter multifuncional, como en la acústica de los espacios existentes clásicos, de gran valor histórico y patrimonial [4], ya que éstos se renuevan con fines culturales que comparten con usos litúrgicos.

Sin pretender ser exhaustivos destacan en este ámbito, el pionero trabajo de Raes et al. [5], comparando los tiempos de reverberación de dos basílicas romanas, estructuralmente muy diferentes, también Shankland et al. [6], amplían el estudio anterior incorporando la basílica de San Pedro, Tzekakis, estudia varias iglesias ortodoxas de Tesalónica [7], Fearn et al. algunas iglesias europeas occidentales [8], y Lewers presenta algunas características sonoras de la catedral de San Pablo en Londres [9]. A partir de estos primeros trabajos proliferan otros estudios más avanzados sobre las condiciones acústicas de iglesias en otros países, destacan la recopilación de Desarnaulds et al. de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas, [10], el estudio de iglesias portuguesas llevado a cabo por Carvalho [11], y también los tratamientos de las superficies para mejorar la inteligibilidad de la palabra y el apoyo electroacústico en mezquitas, con las contribuciones de Hammad [12], y Adel [13], entre otros.



Figura 1. Imagen interior de la Catedral de Sevilla.

La complejidad y características del campo sonoro de los espacios litúrgicos interesan asimismo al equipo investigador italiano liderado por E. Cirillo, al estudiar una tipología de iglesias italianas (iglesias románicas de la región de Apulia) [14], cuyos resultados extienden a otros espacios eclesiales de diferentes tipologías y volúmenes [15]. Los esfuerzos de este grupo en relación a la acústica de espacios religiosos católicos han abarcado múltiples aspectos: teóricos objetivos [16], subjetivos [17], y prácticos [18].

Las singulares características acústicas de los enormes y complejos espacios reverberantes como son las catedrales, han suscitado en estos años también el interés de los investigadores: existencia de espacios acoplados en la catedral de San Pablo (Londres) [19]; también la identificación de volúmenes acoplados en la basílica de San Pedro (Roma) [20]; y ajustes de acústica variable en la catedral de Boston (Estados Unidos) [21]; son algunos ejemplos.

Más recientemente, la fascinación por las capacidades de predicción de los modelos de simulación digital basados en la acústica geométrica ha alcanzado también a los recintos de culto [22, 23]. Estas poderosas herramientas de simulación permiten estudiar virtualmente el comportamiento acústico del espacio a futuro, antes de construirlo, y producir señales audio del mismo a partir de las respuestas al impulso binaurales sintéticas. También con estas técnicas de predicción resulta plausible controlar los experimentos de manera más enfocada, reduciendo el número de variables implicadas, lo que permite desentrañar las causas de los fenómenos, y ayudar a corroborar ciertas hipótesis [20]. Las posibilidades de recreación de situaciones acústicas pasadas permiten también llevar a cabo lo que se llama arqueología acústica, y posibilita incorporar en los grandes lugares de culto, de gran valor patrimonial, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio intangible.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste, y validación del modelo computacional 3D de la catedral de Sevilla, teniendo en cuenta una única posición de la fuente de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y analizando exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el comienzo de un ambicioso trabajo sobre este espacio catedralicio que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones, para recrear el comportamiento acústico del espacio y para su posible utilización en la valoración subjetiva de la percepción acústica del mismo.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL

La catedral gótica cristiana de Sevilla, también conocida como “Santa María de la Sede”, se sitúa al sur del centro histórico de la ciudad andaluza. El solar en el que se encuentra estaba ocupado por una antigua mezquita aljama, la cual, tras la conquista, fue cristianizada y posteriormente derribada con el fin de construir el edificio gótico en la misma superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [24]. Ciertos historiadores datan el inicio de las obras en 1401, sin embargo, no existe testimonio escrito hasta 1433 [25]. El proceso constructivo, iniciado desde el trascoro hasta la cabecera, fue dirigido por diferentes maestros a lo largo de los años.

El espacio interior del templo gótico, se articula en cinco naves orientadas al este, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. Su estructura cuenta con 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, 32 de ellos exentos,



Figura 2. Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

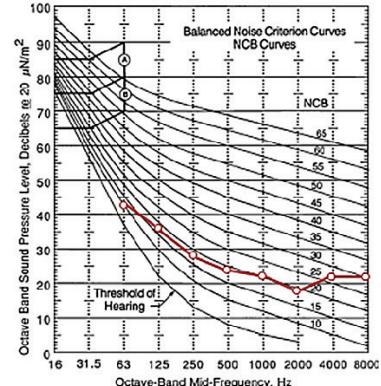


Figura 3. Espectro de ruido medido valorado sobre las curvas NCB.

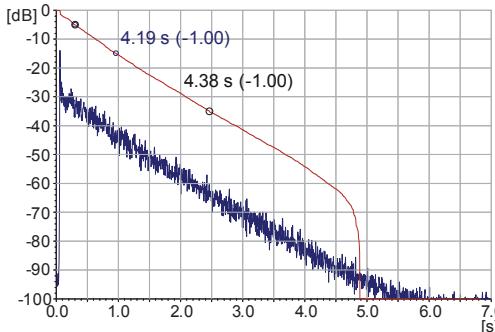


Figura 4. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas (izquierda) y simuladas (derecha) para el punto 13 filtradas a 1 kHz.

sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren las diversas naves. La catedral presenta solería de mármol blanco y azul grisáceo. Ver Figura 1.

El coro, situado en la nave central, cuenta con una sillería de madera tallada por diversos artistas. Su entrada está delimitada por una gran reja renacentista, y los tres lados restantes están cerrados por muros de cantería, en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales. El órgano está formado por dos grandes cajas situadas sobre los muros laterales, a ambos lados del coro. En la cabecera del templo se sitúa la Capilla Real, donde se celebra diariamente la liturgia. Forma un amplio, recinto cerrado por un ábside semicircular y cubierto por una solemne cúpula. Una gran reja cubierta con densas cortinas delimita la entrada a la misma.

En definitiva, la catedral se convierte en un lugar de culto y oración en el que en ciertas ocasiones se llevan a cabo grandes ceremonias y festividades que la transforman en un gran teatro sacro.

TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las respuestas impulsivas (RI) se han obtenido siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [26]. Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 28 posiciones de micrófonos distribuidos por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (ver Figura 2), se han dispuesto 24 receptores en la parte de la izquierda y 4 en la derecha para que actúen como controladores. Se presenta aquí el estudio realizado para la posición de la fuente F1, ubicada en el altar mayor a 1,50 metros sobre el suelo.

Para cada posición de la fuente se han estudiado las posiciones del micrófono en el conjunto de puntos recepción en los que se recibe sonido directo. En cada punto de recepción, situado a 1,20 metros del suelo, se registraron las respuestas al impulso a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 16.000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir una relación señal-ruido superior a 45 dB para las bandas de octava de interés.

Todos los ensayos experimentales se realizaron con el templo desocupado, en periodo nocturno. La temperatura y la humedad relativa variaron entre 25 y 25,5 °C y 55 y 58 %, respectivamente. El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 4 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 30,7 dBA. En todo caso la relación señal-ruido se mantuvo muy por encima de 45 dB en todas las frecuencias de interés, valor mínimo requerido para medir con fiabilidad T30. En la Figura 3 se representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NBC, que se puede valorar como NCB-30.

A modo de ejemplo en la Figura 4 se muestra la curva de energía y la integral de Schroeder, filtradas para la octava de 1 kHz, calculadas a partir de la RI medida en el punto 13, excitando la sala con la fuente situada en la posición F1. A partir de estas RI se derivan los valores de los principales parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T30), tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (TS), definición (D50), claridad (C80), fuerza sonora (G), fracción de energía lateral precoz (JLF) e índice de transmisión de la palabra (STI).

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal barrido en frecuencia se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, siendo previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K type 2734. La respuesta al impulso se capturó con un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización Earthworks-LAB 1.

SIMULACIÓN ACÚSTICA

Se ha creado un modelo geométrico virtual simplificado de la catedral de Sevilla para simular su comportamiento acústico, mostrado en la Figura 5. Dicho modelo está compuesto por 7.516 planos y tiene un volumen de 216.192 m³.

El modelo se ha calibrado siguiendo un proceso iterativo mediante el cual se ajustan los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas

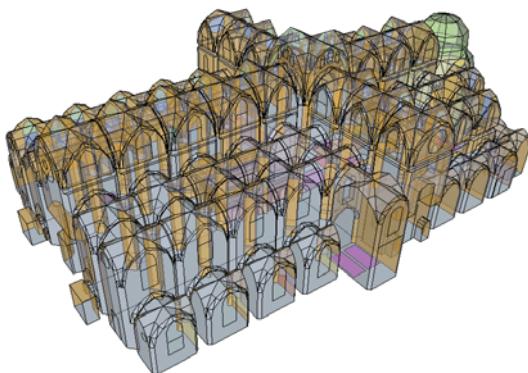


Figura 5. Modelo geométrico 3D de la Catedral de Sevilla.

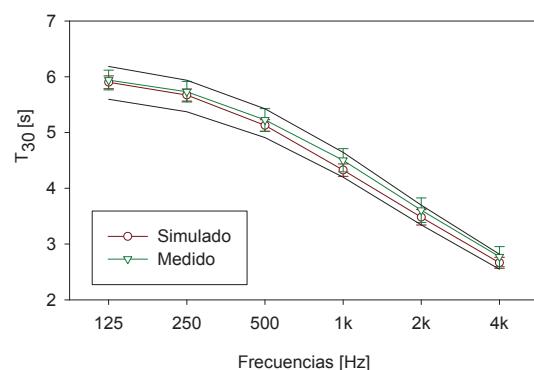


Figura 6. Tiempo de reverberación medido y simulado promediado espacialmente y dispersión espacial valorada por la desviación estándar asociada (barras verticales).

Tabla 1. Coeficientes de absorción acústica asociados a los principales materiales utilizados en la simulación.

Material	Área [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sillería*	65,1	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	14,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras*	5,3	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla*	2,8	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	2,1	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	1,9	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	1,4	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	1,1	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18

* Materiales usados para calibrar el modelo.

consideradas no difiera en más de 1 JND, just noticeable difference (5% para T) [26], del valor promedio medido experimentalmente. Aunque el JND tiene validez para los valores promedios de los parámetros, hemos aceptado dicho valor para cada banda de octava.

En la Figura 6 se representa el promedio espacial del T30, tanto medido como simulado, con su desviación estándar correspondiente obtenida para cada banda de octava, así como los límites aceptados aplicando el criterio de 1 JND.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuyo porcentaje relativo de superficie es mayor al 1%. Los coeficientes de dispersión de estos materiales varían según sea el grado de irregularidades que presenta cada superficie, de modo que los materiales de superficie lisa tienen un coeficiente de scattering asociado que varía de 0,12 en la banda de 125 Hz a 0,17 en la de 4 kHz aumentando 0,01 en cada banda. Los de decoración moderada pasa de 0,20 en 125 Hz hasta 0,45 a 4 kHz aumentando 0,05 en cada banda, y en los más irregulares varía de 0,30 en la banda de 125 Hz a 0,80 en la de 4 kHz aumentando 0,10 en cada banda [20].

El software utilizado para realizar la simulación acústica ha sido CATT-Acoustic v8k. Se ha utilizado el modo “cálculo detallado completo” basado en el Randomized Tail-corrected Cone-tracing, un método híbrido desarrollado a partir de algoritmos de predicción basados en los métodos de fuentes imagen, trazado de rayos y trazado de conos. Tanto el número de rayos como el tiempo de truncado empleados en la simulación se determinaron de forma manual, siendo 300.000 rayos y 7 s respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fijando la atención en las diferencias entre los valores promediados espacial y espectralmente, medidos y simulados, en términos de sus JND [20], [26], y recogidos en la Tabla 2, se aprecia como para la mayoría de los parámetros dichas diferencias son inferiores a 1 JND, y en ningún caso superan los 3 JNDs, lo que es un indicativo del buen funcionamiento del modelo. Los parámetros energéticos son los que presentan las diferencias más significativas.

Tabla 2. Valor promediado espacial y espectralmente de los parámetros acústicos estudiados, y diferencias JND.

Parámetros	Simulados	Medidos	JND
T ₃₀ [s]	4,73	4,86	0,56
EDT [s]	4,15	4,06	0,41
T _S [ms]	227,89	272,86	1,94
D ₅₀	0,37	0,26	2,28
C ₈₀ [dB]	-1,18	-3,63	1,64
J _{LF}	0,09	0,12	0,67
G [dB]	0,30	1,23	0,92
STI	0,52	0,48	-

En la Figura 7 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de los parámetros acústicos estudiados. Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava. Si se observan los valores medios del tiempo de reverberación inicial, puede comprobarse que, el comportamiento espectral del valor medido y simulado es muy similar, siguiendo la tendencia en frecuencia esperada, es decir, el EDT disminuye a medida que aumenta la frecuencia, sobre todo a partir de 2 kHz, donde se hace notoria la absorción del aire. En el resto de los parámetros, a nivel general, se obtienen valores simulados promediados espacialmente muy coincidentes con los medidos en medias y, especialmente, en altas frecuencias. Más deficientes resultados se obtienen para las bajas frecuencias, en especial para la banda de octava de 250 Hz. La fuerza sonora simulada, por ejemplo, difiere hasta en 5 dB de la medida experimental. En el caso de la fracción de energía lateral precoz las diferencias son aceptables en todas las bandas de octava. Además, las tendencias en frecuencia de los valores medidos y simulados son muy parecidas en todos los parámetros acústicos analizados.

Se observa también, que los valores de las desviaciones correspondientes a las simulaciones son del mismo orden, o menores, que las encontradas en las medidas experimentales. La mayoría de las desviaciones superan, para cada parámetro, frecuencia, fuente, medida in situ y simulado, un JND, por lo que en diferentes zonas de la catedral la sensación percibida será diferente.

Con objeto de verificar la validez de la simulación, punto a punto y por frecuencias en la Figura 8 se representa el porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias, expresadas en términos de JND, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, se encuentran por debajo de cierto umbral. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y a excepción de la banda de 250 Hz, más del 50% de los puntos se sitúan dentro de este rango. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso el número de puntos bajo dichas condiciones crece al 70%, llegando en algunos casos hasta el 100%. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera bastante aproximada las características del campo acústico creado en el recinto ubicando una fuente sonora en la posición F1. Respecto a la inteligibilidad, medida con el índice STI, cabe destacar que los valores medidos y simulados son muy aproximados en la mayoría de los puntos receptores. El STI es aceptable cuando la distancia emisor-receptor es pequeña, donde la relación señal ruido es mayor, pero como es de esperar, va decayendo conforme aumenta dicha distancia, ver Figura 9.

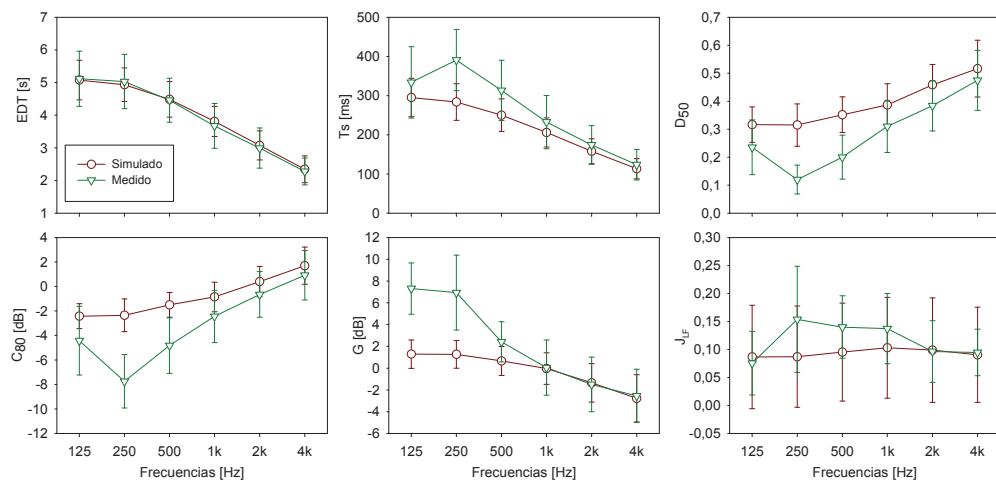


Figura 7. Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados, promediados espacialmente y su desviación estándar.

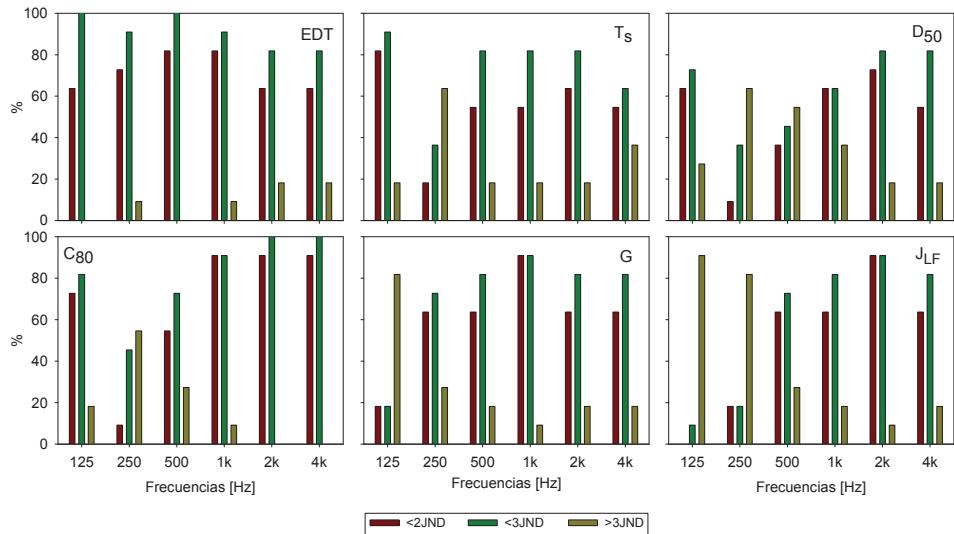


Figura 8. Porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias JND entre los valores medidos y simulados se encuentran dentro de cada rango, para cada parámetro.

CONCLUSIONES

Se ha generado y calibrado un modelo de la catedral de Sevilla, patrimonio de la humanidad y la mayor catedral gótica del mundo, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La calibración se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Cuando se evalúa el valor medio en frecuencia de cada parámetro los resultados obtenidos son altamente satisfactorios. Al estudiar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa que la aproximación entre los valores medidos y simulados es, en general, bastante aceptable, presentando menores similitudes a bajas frecuencias. Por último, las diferencias entre valores medidos y simulados en cada punto receptor expresadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admitido para este espacio, 3 JND. Por lo tanto, puede aceptarse como buena la simulación implementada del campo acústico del templo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán y al arquitecto conservador de la catedral de Sevilla, por facilitarnos el acceso para la realización de las medidas. También agradecen a J. R. Barroso Morales la valiosa ayuda prestada en las medidas acústicas y a J. A. Garrido Alcázar su disponibilidad, colaboración, y su cuidada labor fotográfica de este espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

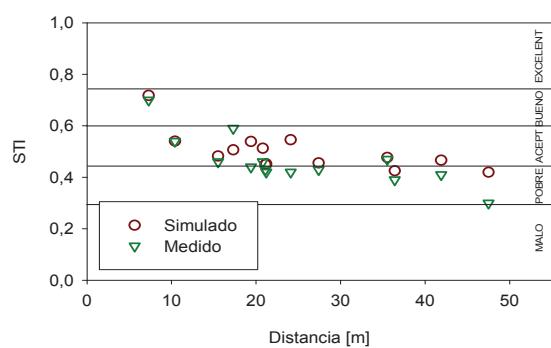


Figura 9. Variación del STI simulado y medido en función de la distancia a la fuente.

REFERENCIAS

- [1] L.L. Beranek, "Concert hall acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 92(1), 1-39 (1992).
- [2] E. Cirillo, F. Martellotta, "Worship, Acoustics and Architecture," Multiscience, Brentwood UK, (2006).
- [3] M. K. Abdelazeed, R. N. Hammad, A. A. Mustafa, "Acoustics of King Abdullah mosque," *J. Acoust. Soc. Am.* 90(3), 1441-1445 (1991).
- [4] Z. Karabiber, "A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project," on de CD – ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, Seventh International Congress on Sound and Vibration, Germany (2000).
- [5] A. C. Raes, G. Sacerdote, "Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas," *J. Acoust. Soc. Am.* 25(5), 925-961 (1953).
- [6] R. S. Shankland, H. K. Shankland, "Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 50(2), 389-396 (1971).
- [7] E. Tzakakis "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki," *Acustica* 43(2), 275-279 (1979).
- [8] R. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches," *J. Sound Vib.* 43(3), 562-567 (1975).
- [9] T. H. Lewers, J. S. Anderson, "Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London," *J. Sound Vib.* 92(2), 285-297 (1984).
- [10] V. Desarnoulds, K. Eggenschwiler, S. Bossoney, "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"), Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711 (1998).
- [11] A. P. O Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches," *Appl. Acoust.* 58(1), 33-49 (1999).
- [12] R. N. Hammad, "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan," *Appl. Acoust.* 30(4), 335-345 (1990).
- [13] A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," *J. Acoust. Soc. Am.* 113(3), 1505-1517 (2003).
- [14] E. Cirillo, F. Martellotta, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches," *Appl. Acoust.* 64(1), 1-23 (2002).
- [15] E. Cirillo, F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118(1), 232-248 (2005).
- [16] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 125(3), 1281-1284 (2009).
- [17] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 654-663 (2010).
- [18] F. Martellotta, M. D'Alba, "On site validation of sound absorption measurements of occupied pews," *Appl. Acoust.* 72(12), 923-933 (2011).
- [19] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London," *J. Sound Vib.* 236(2), 209-225 (2000).
- [20] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1175-1186 (2009).
- [21] D. L. Klepper, "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.* 99(1), 417-425 (1996).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1207-1218 (2009).
- [23] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá, "A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain," *Acta Acustica-Acoustica* 97(1), 155-170 (2011).
- [24] D. A. Cardoso, "Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo," Ediciones Guadalquivir (2006).
- [25] A. Jiménez, "Cartografía de la montaña hueca: notas sobre los planos históricos de la Catedral de Sevilla," Cabildo Metropolitano de la Catedral de Sevilla, (1997).
- [26] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).



EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

MODELO ACÚSTICO VIRTUAL DE LA CATEDRAL RENACENTISTA DE JAÉN

PACS: 43.55.Ka

Álvarez-Morales, L.; Franco, A.J.; Alonso, A.; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T.
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain. Tel.: +34 954555979. Fax: +34 954557892.
E-Mail: calvarez6@us.es, artfrafui@us.es, aliciaalonso@us.es, sgiron@us.es,
mgalindo@us.es, teofilo@us.es

ABSTRACT

The Cathedral of Jaen is one of the gems of Spanish Renaissance architecture, which served as a model for the construction of other cathedrals in Spain and America. Its experimental acoustic parameters have been determined, and employed to adjust a 3D model in order to virtually recreate its current acoustic behaviour. This model provides a basis for the analysis of acoustics of historical events and of possible future interventions. In this paper, the results of this adjustment process are presented and the acoustic behaviour of the space is analysed in terms of the values of measured and simulated parameters for the preeminent position of the source: the high altar.

RESUMEN

La catedral de Jaén es una de las joyas arquitectónicas del renacimiento español, que sirvió de modelo para la construcción de otras catedrales en España y América. Se han determinado experimentalmente los parámetros acústicos en su interior, y se han utilizado para ajustar un modelo 3D con el fin de recrear virtualmente su comportamiento acústico actual, el cual servirá de base para analizar comportamientos pretéritos o valorar posibles intervenciones futuras. En este trabajo se presentan los resultados de este proceso de ajuste y se analiza el comportamiento acústico del espacio, en términos de los valores de los parámetros medidos y simulados, para la posición preeminente de la fuente: el altar mayor.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el campo de la acústica virtual integra un conjunto de técnicas de modelado acústico, simulación computacional, y de presentación audible del campo sonoro en entornos interiores y exteriores, capaces de proporcionar descriptores paramétricos o recreaciones virtuales de los mismos con diferentes propósitos. El modelado computacional se ha convertido en una herramienta imprescindible de la ingeniería aplicada al estudio de fenómenos sonoros complejos y en una parte integral del proceso de diseño acústico. Los modelos computaciona-

44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA

ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

les crean una representación matemática del entorno acústico basada en descripciones geométricas, analíticas, numéricas, estadísticas, o combinaciones de ellas, del fenómeno físico a considerar, implicando en el proceso operaciones matemáticas muy extensas que son realizadas por los ordenadores. En los modelos acústicos computacionales, el objetivo final es, en el caso de recintos cerrados, conseguir la respuesta al impulso (RI) en una localización específica de fuente-receptor a partir de la cual se pueden obtener los datos relativos al tiempo, frecuencia y dirección de la energía sonora que alcanza al receptor.

Los modelos geométricos computacionales en acústica de salas fueron introducidos por Schroeder *et al.* en 1962 [1], y las primeras implementaciones, un poco más tarde, por Kroksstad *et al.* [2]. Los algoritmos de los programas informáticos estándares están basados en la acústica geométrica y han sido utilizados profusamente, como herramientas de diseño y evaluación, en teatros y salas de conciertos. En estas aproximaciones, los fenómenos ondulatorios en la descripción de los campos sonoros degeneran en entes puramente geométricos: rayos sonoros que se propagan desde la fuente hasta el receptor directamente o tras reflejarse en los confines del recinto. En este contexto no se consideran los efectos de fase en la propagación de la energía acústica. Las predicciones correspondientes solo son válidas para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder de la sala que se puede expresar en función del tiempo de reverberación (T , en s) y del volumen de la sala (V , en m^3): $f_s = 2000\sqrt{T/V}$ (Hz).

Otro aspecto clave en la acústica geométrica es el tipo de reflexiones que pueden ser manipuladas. Los modelos iniciales de acústica de salas más comunes, trazados de rayos/haces [2, 3], de las fuentes imagen [4], o combinaciones de ambos [5], estaban basados en reflexiones puramente especulares; otros modelos menos usuales asumían las reflexiones como puramente difusas [6]. En una superficie real, la reflexión es una mezcla de estos dos extremos, por lo que varios autores han presentado modelos híbridos en esta dirección [7], capaces de predecir fenómenos complejos como el eco flotante [8]. Algunos de los algoritmos de acústica geométrica se han modificado para incorporar el tratamiento de alguno de los fenómenos típicamente ondulatorios como el scattering o la difracción en los bordes [7, 9]. El siguiente paso adelante en la mejora de los algoritmos de cálculo, sobre todo en el caso en que el carácter ondulatorio sea determinante, especialmente en el rango de bajas frecuencias, son los modelos computacionales basados en la ecuación general de ondas. Su resolución pasa por la caracterización de los cerramientos, en términos de su impedancia acústica, y la aplicación de los métodos numéricos (elementos finitos, de contorno, diferencias finitas,...).

Otra importante contribución en las técnicas de simulación lo constituyen las técnicas de auralización en tiempo real, integradas en sistemas de realidad virtual, que proporcionan condiciones visuales y de escucha muy realistas, con posibilidades de variados propósitos: tests psicoacústicos multisensoriales [10], usos en arqueología acústica para recrear escenarios arquitectónicos desaparecidos o para la incorporación de los aspectos acústicos, como patrimonio inmaterial, a recintos de gran valor cultural y patrimonial, son algunos ejemplos.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste y validación del modelo geométrico computacional 3D de la catedral de Jaén. Se centrará la atención en una única posición de la fuente, de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y se analizarán exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el inicio de un programa de trabajo sobre este espacio catedralicio, que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL DE JAÉN

La Santa Iglesia Catedral de la Asunción de Jaén, de estilo renacentista, se ubica en la plaza de Santa María de la ciudad andaluza. La extensa duración del proceso constructivo, así como la intervención de múltiples directores de obras, supuso la coexistencia de diferentes estilos arquitectónicos. Al igual que en otros casos, el solar del templo estaba ocupado en su origen por

44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

la Mezquita Mayor de la ciudad musulmana, que fue consagrada en 1246 como templo cristiano tras una primera conquista. Un incendio producido en 1368 a raíz de la reinvención árabe, genera grandes desperfectos y destruye los restos del templo, por lo que se decide construir una iglesia de nueva planta, proyectada en estilo gótico y con cubierta de madera, ésta contaba con cinco naves y un claustro situado hacia el lado norte. La deficiente construcción de este templo angosto y mal iluminado supone una amenaza de ruina, por lo que se decide demoler la capilla mayor y el crucero con el objetivo de emprender una nueva construcción, proyecto potenciado principalmente por el derrumbe del cimborrio en 1525 [11]. La construcción de la nueva catedral renacentista estuvo dirigida por varios arquitectos, de entre los cuales cabe destacar la labor de Andrés de Vandelvira, quien dirigió personalmente las obras de diversas dependencias. El proceso constructivo del templo, iniciado en el segundo tercio del siglo XVI, se prolongará durante algo más de dos centurias, hasta mediados del siglo XVIII, en el que se llevará a cabo el cerramiento de las bóvedas y capillas de la nave norte [12].

Con unas dimensiones de aproximadamente 70 m de ancha y 100 m de larga, la planta, tipo salón, define el templo, en el que conviven diferentes estilos: renacentista, barroco, churriguresco y neoclásico. La cabecera es rectangular y el templo se estructura en tres naves longitudinales divididas por pilares cruciformes corintios, coronados por arcos de medio punto que sustentan la techumbre conformada por bóvedas vaídas. En la intersección de la nave central con el crucero se ubica una gran cúpula semiesférica de 12,5 metros de diámetro que alcanza una altura libre de casi 50 metros. A lo largo del perímetro se localizan las capillas laterales, cuyas obras no se concluyeron hasta el siglo XVIII. Entre el crucero y la Capilla Mayor se ubica el presbiterio (Figura 1), un amplio espacio abierto en sus cuatro lados y elevado una altura de cinco peldaños.

El coro, situado en el centro de la planta, es uno de los más grandes y altos de España. Cuenta con un total de 69 sitiales en el nivel superior y 53 en el inferior. La sillería es de madera de nogal y fue tallada en el siglo XVI por diferentes artistas. El órgano ubicado sobre los muros de cantería del espacio coral (Figura 1), fue creado en 1660 y posteriormente reparado en 1705. Su caja, que aún perdura, fue tallada en 1780 en sus dos fachadas. Un nuevo órgano fue realizado en 1790, que posteriormente sería sustituido por otro elaborado en 1941.

En 1733, el maestro mayor José Gallego delineó el alzado del trascoro, una obra que se concluyó en el año 1791 [13]. El conjunto alterna paños anchos y rectos con otros cortos y cóncavos. Se articula en un solo piso con pilastras corintias menos esbeltas que las de las naves.

MÉTODO EXPERIMENTAL

El ambiente sonoro se describe a partir de las respuestas al impulso medidas, atendiendo a los diferentes usos que tienen lugar en la catedral (litúrgicos, musicales, culturales, etc.), donde la

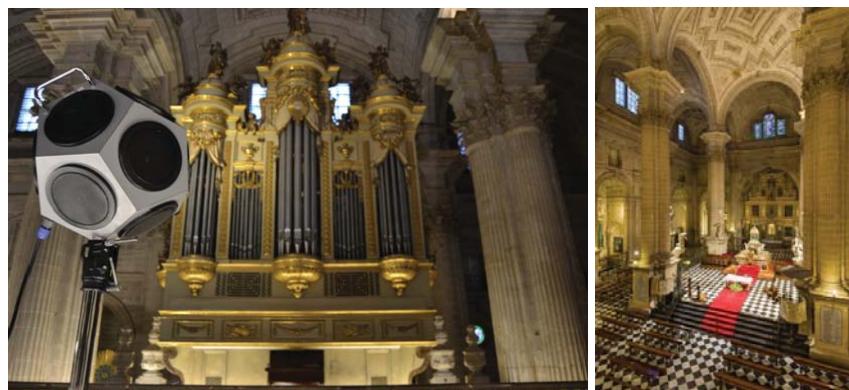


Figura 1. Vista del órgano (izquierda) y del altar mayor y crucero (derecha) de la Catedral de Jaén.

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

percepción sonora juega un papel muy importante. La presencia de fieles o público en general, estará asociada a dichos usos, existiendo, además, una lógica interdependencia entre las diferentes zonas y la posición de la fuente sonora.

Aunque se han medido las RIIs considerando diferentes posiciones de la fuente sonora y un conjunto de receptores asociado a cada una de ellas (Figura 2), el presente estudio se centra en los resultados de la fuente F1, ubicada en el altar mayor y asociada con las principales celebraciones litúrgicas y algunas actividades culturales, y los 21 receptores distribuidos por las zonas laterales del altar mayor, el transepto y el coro, todas ellas ocupadas por bancos de madera. Las medidas se llevaron a cabo con el templo vacío. Se monitorizaron las condiciones ambientales midiendo la temperatura y la humedad relativa y se siguieron las recomendaciones de la UNE-EN-ISO 3382 [14] y otras específicamente relacionadas con los recintos de culto [15].

El proceso de generación de la señal de barrido exponencial en frecuencia para excitar el recinto, la adquisición y el análisis de las respuestas al impulso se realizaron con el programa WinMLS2004 a través de la tarjeta de sonido Edirol UA-101. La señal generada fue emitida por una fuente dodecaédrica AVM DO-12 con un amplificador de potencia B&K 2734 y un subwoofer Beringher Eurolive B1800D-Pro autoamplificado, incorporado con el fin de mejorar la relación señal-ruido impulsiva a bajas frecuencias. En cada punto de recepción se recogieron las RIIs monoaurales usando un micrófono multipatrón (omnidireccional y figura de ocho) Audio-Technica AT4050/CM5 conectado a una fuente de polarización Sound Field SMP200 de 4 canales. Las RIIs binaurales se obtuvieron con un simulador de torso Head Acoustics HMS III (Code 1323) y el acondicionador de señal B&K-2829.

SIMULACIÓN

La simulación acústica se llevó a cabo utilizando el programa CATT-Acoustic v9 [9], basado en algoritmos de acústica geométrica. Para ello se creó un modelo geométrico simplificado compuesto de 1837 planos y un volumen aproximado de 85100 m³ (Figura 3). Para adecuar las condiciones acústicas de simulación con las de la situación real, el modelo ha pasado por un proceso iterativo de sintonización en el que se ajustan los coeficientes de absorción de las columnas y muros de piedra de la catedral. El proceso se da por concluido cuando los tiempos de reverberación simulados, en cada banda de octava, promediados espacialmente, no difieran en más de un JND (5%) de los correspondientes valores medidos *in situ*. El resultado del proceso se muestra en la Tabla 1.

En la Tabla 2 aparecen los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuya superficie relativa es mayor de 0,4%, junto con los colores asociados en la Figura 3 y sus referencias bi-

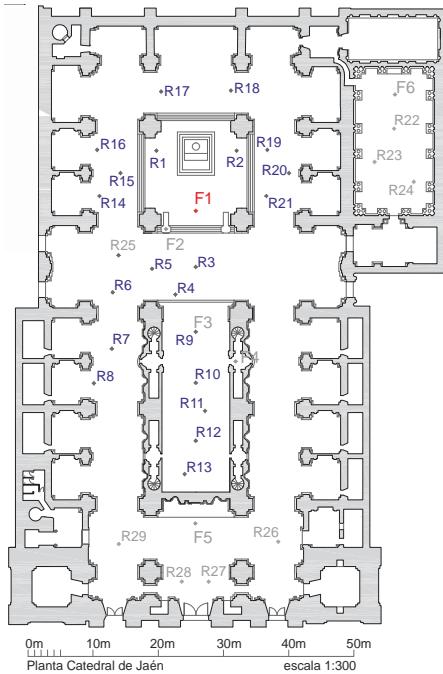


Figura 2. Planta de la catedral de Jaén con indicación de las posiciones de fuentes y receptores. En rojo la fuente y en azul los receptores utilizados en esta comunicación.

Tabla 1. Valores del tiempo de reverberación medidos y simulados tras el proceso de ajuste.

	125	250	500	1k	2k	4k
T medido	9,09	9,58	8,51	7,19	5,40	3,64
T simulado	9,34	9,42	8,65	7,49	5,57	3,81
Diferencia (%)	2,71	1,72	1,67	4,07	3,23	4,76

44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

bibliográficas. También se asignan los coeficientes de dispersión con estos criterios: 0,1 en todas las bandas de octava a las superficies lisas; a las superficies escasamente decoradas se asignan valores que varían desde 0,12 para 125 Hz, hasta 0,17 para 4 kHz, aumentando 0,01 en cada banda; las superficies decoradas, con poca profundidad, se asignan valores que varían linealmente de 0,20 para 125 Hz, hasta 0,45 para 4 kHz, aumentando 0,05 en cada banda; finalmente, para bancos, esculturas y bóvedas, la variación va desde 0,30 para 125 Hz, hasta 0,80 para 4 kHz, aumentando 0,10 en cada banda [16]. En el modelo 3D de la Figura 3 los materiales que tienen el mismo coeficiente de absorción, pero diferentes coeficientes de dispersión están representados en la misma gama de color.

Los cálculos se obtuvieron con el motor TUCT v1.0h (The Universal Cone Tracer), el cual calcula los parámetros acústicos a partir de los ecogramas de energía (E) y/o de las respuestas al impulso (h). En concreto se optó por el algoritmo para recintos cerrados (cálculo corto), auralización básica con un orden máximo de *split* 0. El número de rayos se obtuvo manualmente hasta lograr la convergencia, determinándose en 300000 rayos y la respuesta al impulso se truncaba a los 9 segundos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de cuatro parámetros acústicos estudiados: tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (T_s), claridad (C_{80}) y fracción de energía lateral precoz (J_{LF}). Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava.

Atendiendo a los valores medidos, encontramos las características acústicas esperadas para este tipo de espacios, de gran volumen y con materiales de baja absorción sonora: una elevada reverberación percibida y una baja claridad del sonido, especialmente a bajas y medias frecuencias. La alta absorción del aire a altas frecuencias suaviza estas malas condiciones sonoras subjetivas del oyente. No obstante los valores de espacialidad relacionados con la anchura percibida de la fuente se encuentran dentro del rango típico para salas de concierto y salas polivalentes vacías de hasta 25000 m³ [14].

Tabla 2. Áreas y coeficientes de absorción, por bandas de octava, de los materiales para la simulación.

Superficie, referencia,	Área (m ²)	Área (%)	Color (Fig. 3)	Coeficientes de absorción				
				125	250	500	1k	2k
Paramentos piedra*	12939,4	58,7	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04
Madera tallada [16]	1827,9	8,3	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Columnas piedra*	2217,9	10	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17
Mármol, [17]	3414,3	15,5	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Madera puertas, [18]	89	0,4	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Bancos Mad.-cuero, [19]	82,3	0,4	0,20	0,25	0,29	0,31	0,29	0,25
Bancos Madera, [17]	526,9	2,4	0,10	0,15	0,18	0,20	0,20	0,20
Vidrieras, [18]	402,8	1,8	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Órgano, [20]	292,5	1,3	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Cuadros**	161	0,7	0,15	0,18	0,10	0,10	0,08	0,06

(*) Ajustados en la iteración. (**) Estimados por los autores.



Figura 3. Modelo 3D de la catedral de Jaén utilizado en la simulación acústica.

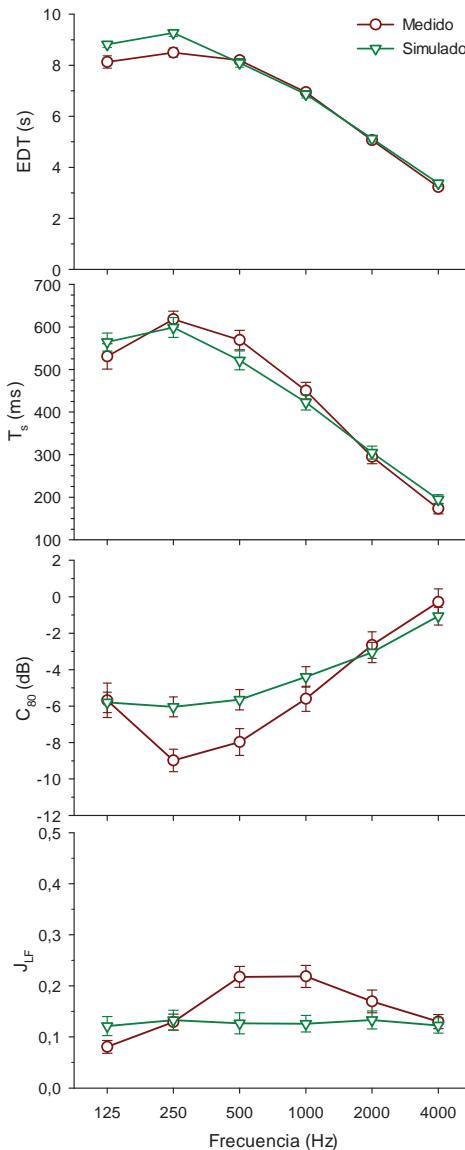


Figura 4. Valores promedio espacial de los valores medidos y simulados.

En todos los parámetros se comprueba que, el comportamiento espectral de los valores medidos y simulados es muy similar. La mayoría de las diferencias entre valores simulados y medidos, para cada parámetro y cada banda de octava no superan un JND. Además los valores de las desviaciones estándar correspondientes a las simulaciones son del mismo orden que las encontradas en las medidas experimentales, por lo que la dispersión espacial es similar hasta el punto que este parámetro puede valorar.

Con objeto de dar una estimación del comportamiento con la distancia fuente-receptor para la claridad del sonido percibida y la inteligibilidad de la palabra, junto con una evaluación punto a punto de los valores medidos y simulados, en la Figura 5 se muestra la dependencia de los valores promediados de T_s y C_{80} para las bandas de octava recomendadas [14], junto con el índice de transmisión de la palabra (STI). Además, a modo de referencia, se incorpora el valor teó-

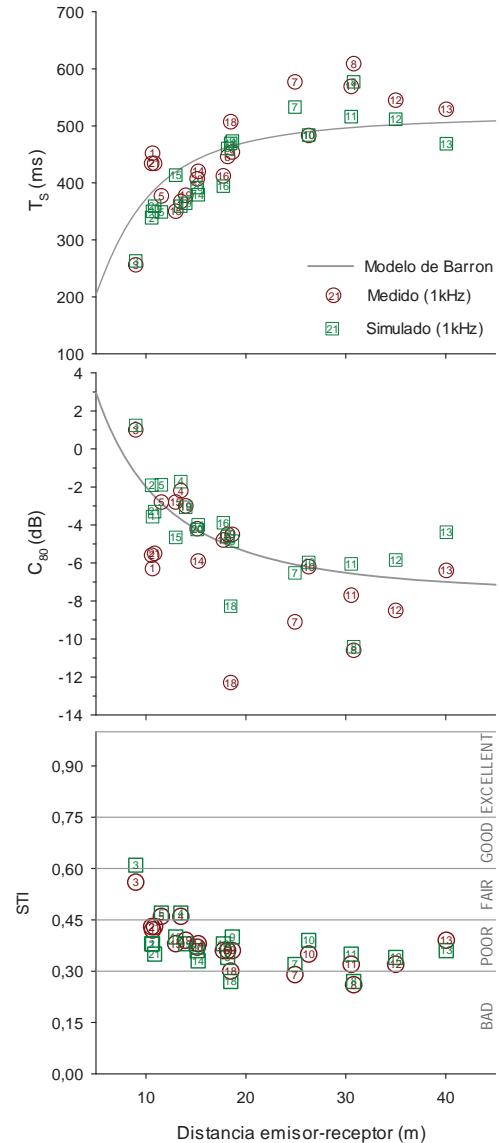


Figura 5. Representación de los valores medidos y simulados frente a la distancia emisor-receptor.

44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

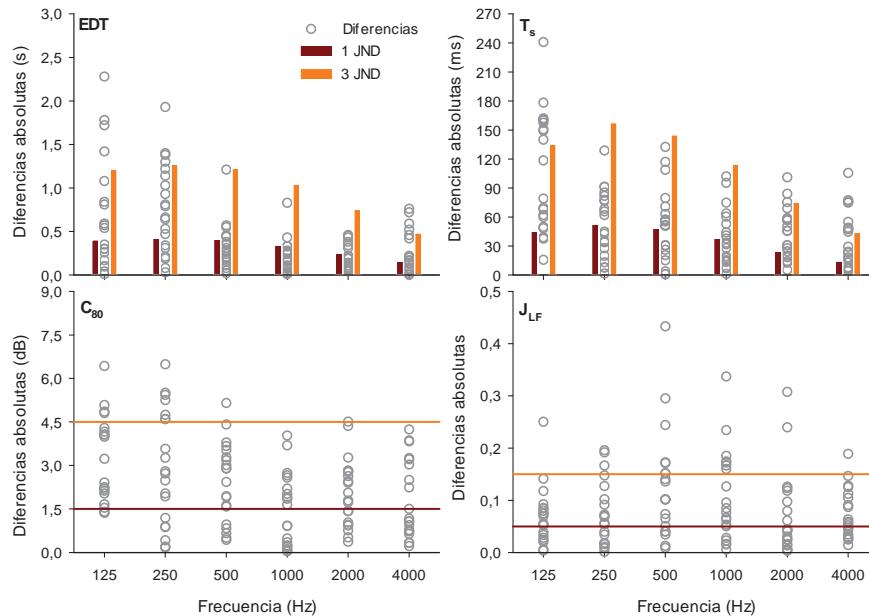


Figura 6. Diferencias punto a punto en valor absoluto entre los valores medidos y simulados para las diferentes bandas de octava. Se indican los valores de 1 y 3 JND para valorar esas diferencias.

rico del modelo de Barron [21]. A nivel general las tendencias de los valores medidos y simulados son parecidas entre sí, con mayores diferencias para C_{80} . En ambos casos queda de manifiesto la pérdida de claridad musical y de inteligibilidad conforme nos alejamos de la fuente sonora. El parámetro STI confirma que la inteligibilidad de la palabra en todo el recinto podría calificarse como *pobre*.

Para cuantificar objetivamente la validez de la simulación en la Figura 6 se presentan las diferencias absolutas, punto a punto y para cada banda de octava, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, valoradas en términos de los JND respectivos [14, 22]. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y bandas de octava, la gran mayoría de los puntos se sitúan dentro de este rango, llegando en algunos casos hasta el 100%. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso casi la totalidad de los valores permanece en este rango. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera suficientemente válida las características del campo acústico creado en el recinto cuando la fuente sonora se ubica en el altar (F1).

CONCLUSIONES

Se ha generado y ajustado un modelo virtual de la catedral de Jaén, considerada una joya arquitectónica del renacimiento español, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La sintonización inicial se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales más singulares del espacio, y por consiguiente menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado, promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas, no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Al evaluar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa una buena aproximación entre el comportamiento de los parámetros acústicos medidos y simulados. También se observan tendencias y valores similares al evaluar el comportamiento de los



44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

parámetros promediados en frecuencia frente a la distancia fuente-receptor. Por último, las diferencias entre los valores medidos y simulados en cada punto receptor, comparadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admisible para este tipo de espacios, 2-3 JND. Por lo tanto, se puede aceptar la fiabilidad de la simulación implementada del campo acústico del templo. En un futuro próximo se extenderá el estudio al resto de las posiciones de la fuente en concordancia con la campaña experimental completa y las respuestas al impulso espaciales y binaurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán de la catedral y a todo el personal que nos atendió durante la realización de las medidas por las facilidades brindadas y el buen trato recibido. También agradecer a J. A. Garrido su esmerado reportaje fotográfico del espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y por el proyecto I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

REFERENCIAS

- [1] M. R. Schroeder, B. S. Atal, C. Bird. "Digital computers in room acoustics". En Proceedings of 4th International Congress on Acoustics ICA, Copenhagen (1962), p. M21.
- [2] A. Krokstad, S. Strøm S. Sørsdal. "Calculating the acoustic room response by the use of a ray tracing technique". J. Sound Vib. 8, 118 (1968).
- [3] T. Lewers. "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics." Appl. Acoust. 38 161-178 (1993).
- [4] H. Lee, B. H. Lee. "An efficient algorithm for the image source technique". Appl. Acoust. 24, 87-115 (1988).
- [5] M. Vörländer. "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image source algorithm". J. Acoust. Soc. Am. 86, 172-178 (1989).
- [6] R. N. Miles. "Sound field in a rectangular enclosures with diffusely reflecting boundaries." J. Sound Vib. 92, 203-226 (1984).
- [7] B. I. Dalenbäck. "Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection." J. Acoust. Soc. Am. 100, 899-909 (1996).
- [8] G. I. Koutsouris, J. Brunsøgk, C.-H. Jeong, F. Jacobsen. "Combination of acoustical radiosity and the image source method". J. Acoust. Soc. Am. 133, 3963-3974 (2013).
- [9] B.-I.L. Dalenbäck. CATT-Acoustic v9 powered by TUCT use manuals. Computer Aided Theatre Technique; Gothenburg (Sweden), 2011.
- [10] M. Vorländer. "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties". J. Acoust. Soc. Am. 133, 1203-1213 (2013).
- [11] P. A. Galera-Andreu. "La Catedral de Jaén". León: Everest, 1983.
- [12] J. Higueras-Maldonado. "La catedral de Jaén: su construcción renacentista (S. XVII-XVIII)". Jaén: Publicaciones de la Universidad de Jaén, 2009.
- [13] A. Ortega-Suca. "La Catedral de Jaén: unidad en el tiempo". Jaén: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental, Delegación de Jaén, 1991.
- [14] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [15] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi. "Guidelines for acoustical measurements in churches". Appl. Acoust. 70, 378-388 (2008).
- [16] F. Martellotta. "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome". J. Acoust. Soc. Am. 126, 1175-1186 (2009).
- [17] M. Vorländer. "Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality". Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [18] T. J. Cox, P. D'Antonio. "Acoustic absorber and diffusers, theory, design and application". London: Spon, 2004.
- [19] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, line 514. <http://www.ptb.de/en/org/1/17/172/datenbank.htm> (visitada 05/07/2013).
- [20] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón. "Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. 126, 1207-1218 (2009).
- [21] M. Barron, L.-J. Lee. "Energy relations in concert auditoria I". J. Acoust. Soc. Am. 84, 618-628 (1988).
- [22] F. Martellotta. "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". J. Acoust. Soc. Am. 128, 654-663 (2010).

red par-



EL SONIDO VIRTUAL DEL PANTEÓN DE ROMA

F. J. López-Martín, L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño-García, S. Girón-Borrero.

Universidad de Sevilla, Dpto. de Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Av. Reina Mercedes 2, 41012
Sevilla, España. Tel. + 34 95 4556612, Fax: +34 95 4557892
{e-mails: fcolopmar@gmail.com, calvarez6@us.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es}

Resumen

El Pantheon fue ordenado construir por Agripa en el año 27 A. C. como templo consagrado a las divinidades romanas, formando parte de las actuaciones de urbanización del *Campo Marzio* en tiempos del emperador Augusto. A comienzos del siglo II D.C. el edificio se encontraba en ruinas y sobre éstas se erigió en el año 120 el edificio actual bajo el mandato de Adriano. Se consagra como iglesia católica en el año 609 bajo la advocación de Santa María de los Mártires. El Pantheon de Adriano es considerado una de las mejores herencias arquitectónicas de la Antigüedad exhibiendo planta circular de 43 m de diámetro y una altura idéntica hasta su gran oculus cenital. En él se utiliza la mayor innovación tecnológica de la época adquiriendo su equilibrio y durabilidad por el procedimiento de aligerar la construcción sin reducir la resistencia de la estructura.

En este trabajo se ha creado un modelo digital 3D del espacio y se ha realizado una simulación acústica mediante el software CATT-Acoustic. El estudio pretende analizar con esta técnica la incidencia del diseño arquitectónico de la *rotonda* y la cúpula en la conducta acústica de este gran y emblemático espacio, que ha inspirado múltiples obras arquitectónicas en todo el mundo a lo largo de la historia.

Palabras-clave: patrimonio arquitectónico, simulación acústica, arquitectura romana.

Abstract

The Pantheon was commissioned by Agrippa in 27 B.C. as a temple for the Roman deities and as part of the urbanization of the *Campo Marzio* under Emperor Augustus. At the beginning of the second century the building was in ruins upon which the current building was erected in the year 120 A.D. under the rule of Hadrian. It was consecrated in 609 as a Catholic church dedicated to St. Mary and the Martyrs. Hadrian's Pantheon is considered one of the major architectural inheritances of Antiquity and features a circular plan of 43 m in diameter and an identical height up to its large zenithal oculus. It was built by employing the greatest technological innovation of the time, and acquired balance and durability through the procedure of lightening the construction without reducing the resistance of the structure.

In this work, a 3D digital model of the space is created and an acoustic simulation by using CATT-Acoustic software is performed. With this technique, the study strives to analyse the incidence of the architectural design of the rotunda and the dome on the acoustic behaviour of this great and emblematic space, which, throughout history, has inspired numerous works of architecture worldwide.

Keywords: architectural heritage, acoustic simulation, Roman architecture.

PACS no. 45.55.Gx, 43.55.Ka

1 Introducción

Las técnicas de predicción basadas en la simulación numérica y que se fundamentan en la acústica geométrica, tienen en cuenta la geometría y la distribución real de la absorción-difusión sonora de los materiales de acabado, así como la ubicación y naturaleza de la fuente sonora para los usos posibles del recinto, y las posiciones de los receptores. Estos modelos digitales proporcionan la respuesta al impulso (RI) en cada receptor, monaurales, binaurales e incluso en formato B-format, que permiten la implementación de auralizaciones de alta calidad, y contienen toda la información acerca de las condiciones acústicas de la sala en tiempo, nivel, espectro y dirección de incidencia. A partir de la obtención de la respuesta al impulso simulada es posible deducir los parámetros acústicos más relevantes del campo sonoro en diferentes entornos arquitectónicos [1-5], utilizar estos modelos virtuales con variados propósitos de investigación [6, 7], así como la generación de muestras de señales de audio que pueden usarse en valoraciones subjetivas o auralizaciones [8]. También con estas técnicas de predicción resulta plausible controlar los experimentos de manera más enfocada, reduciendo el número de variables implicadas, lo que permite desentrañar las causas de los fenómenos, y ayudar a corroborar ciertas hipótesis [9].

En recintos de especial valor patrimonial, escénicos [10], religiosos [11], o culturales [12], el procedimiento puede ser usado además para realizar *arqueología acústica*: reconstrucción virtual de la acústica de épocas pasadas o emular la acústica de edificios singulares desaparecidos (e. g. teatros romanos), lo que posibilita incorporar en estos espacios de gran valor cultural, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio inmaterial. En este contexto, este trabajo analiza el proceso de creación y ajuste de un modelo acústico digital de una obra maestra de la arquitectura romana y que ha llegado a nuestros días en un excelente estado de conservación, El Panteón de Adriano en Roma. En el modelo se han recreado las modificaciones del campo sonoro debido a la presencia de público en condiciones de ceremonias y de visita turística y se han implementado auralizaciones en varias localizaciones para percibir la influencia de la *rotonda* y la cúpula en la acústica del espacio.

El presente estudio ha sido presentado por el primer autor, estudiante del último curso de arquitectura, como trabajo docente de carácter práctico, en una materia formativa de acústica avanzada de su titulación.

2 El Panteón: descripción y reseña histórica

En el mundo antiguo son muy pocos los arquitectos conocidos y menos las obras de las que se conoce su autor, ya que generalmente se atribuían a su promotor, así en casi todos los edificios del mundo romano aparecen inscripciones que reconocen el valor de quien decidió y pagó la construcción. Sin embargo, en la arquitectura de Adriano encontramos un caso singular, su anonimato, debido al perfil intelectual del emperador. En las obras que dependieron de él no intentó manifestar claramente la autoría imperial, en ninguno de los edificios puso su nombre, lo que en casos como el Panteón ha supuesto un considerable conflicto y el que se haya atribuido durante siglos a Agripa, bajo el periodo de Augusto, habiendo existido ambos como dos edificios completamente distintos.

La construcción del Panteón de Adriano, sobre el lugar del anterior de Agripa, se planteó con el mismo concepto del originario, pero el edificio anterior se consideró muerto. Sólo permanecieron sus valores simbólicos, subrayados por la reposición de la inscripción que existía en el antiguo Panteón de Agripa en el nuevo pórtico [13]. El Panteón de Agripa se construyó en el año 25 A.C., en el marco de

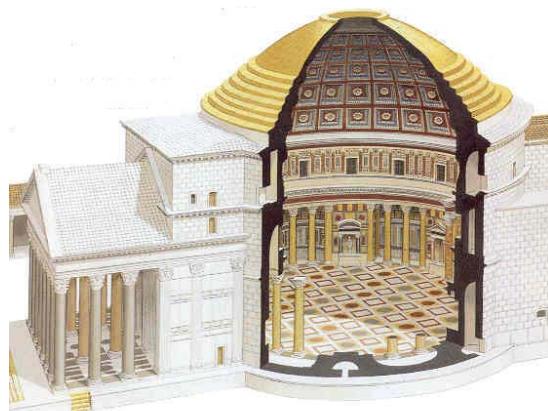


Figura 1 – Perspectiva con corte para vista interior del Panteón de Adriano.

las actuaciones de urbanización del Campo de Marte, con planta rectangular según muestran los restos aparecidos bajo el pórtico de acceso del actual. El edificio sufrió daños por un incendio en el año 80, de los que fue reparado por Domiciano, padeciendo una nueva destrucción en tiempos de Trajano. Los restos descubiertos a finales del siglo XIX nos permiten saber que el templo original guardaba ciertas semejanzas con el actual. Lo que hoy es un pórtico de entrada fue la fachada de un templo *períptero*. La primitiva entrada se efectuaba por el lado opuesto, hacia el sur, ya que en la rotonda actual había una plaza circular porticada. Al otro lado de esa plaza se encontraba la basílica de Neptuno.

La construcción del segundo Panteón debió corresponder a la primera mitad del periodo de Adriano y se realizó en dos fases: en la primera se acometió la *rotonda* y el espacio interior y en la segunda se levantaron el pórtico de acceso y la plaza perimetral de cierre. Se cambió la orientación respecto del panteón precedente, colocando la fachada principal hacia el norte. El edificio quedó compuesto por una columnata a modo de *pronaos*, una amplia *cella* circular y una estructura prismática intermedia. El gran *pronaos* y la estructura de unión con la *cella* ocuparon por completo el espacio del templo anterior, mientras que la *rotonda* fue construida sobre el espacio de la plaza augustea que separaba el panteón de la basílica de Neptuno.

El espacio interior de la *rotonda* está constituido por un cilindro cubierto por una semiesfera. El cilindro tiene una altura igual al radio, y la altura total es igual al diámetro, por lo que se puede inscribir una esfera completa en el espacio interior (ver Figuras 1 y 2). El diámetro de la cúpula es de 43,44 m, lo que la convierte en la mayor cúpula de hormigón en masa de la historia.

El *pronaos octóstilo*, con ocho columnas en la fachada, y cuatro en los laterales, mide 34,20×15,62 m, y se eleva 1,32 m sobre la plaza. La altura total es de 14,15 m y los fustes tienen un diámetro de 1,48 m en la base. El friso contiene la inscripción de Agripa en letras de bronce, y en el arquitrabe se grabó posteriormente una segunda inscripción relativa a la restauración acometida en tiempos de Septimio Severo. Al interior, dos filas de cuatro columnas dividen el espacio en tres naves, la central, y más amplia, conduce a la gran puerta de acceso a la *cella*, mientras las dos laterales terminan en dos amplios nichos. La cubierta a dos aguas está soportada por cerchas de madera apoyadas sobre una estructura de muros que apoya por medio de arcos en las columnas. El cuerpo intermedio que conecta el *pronaos* con la *cella* está construido en opera latericia (hormigón con ladrillo), y consta de dos grandes machones adosados a la *cella*. Al exterior, la estructura tiene la misma altura del cilindro de la *rotonda*. Sobre este cuerpo existe un segundo frontón de ladrillo, de una altura mayor. Esta diferencia de nivel ha hecho suponer que el *pronaos* estaba previsto de mayores dimensiones, (Figuras 1 y 2).

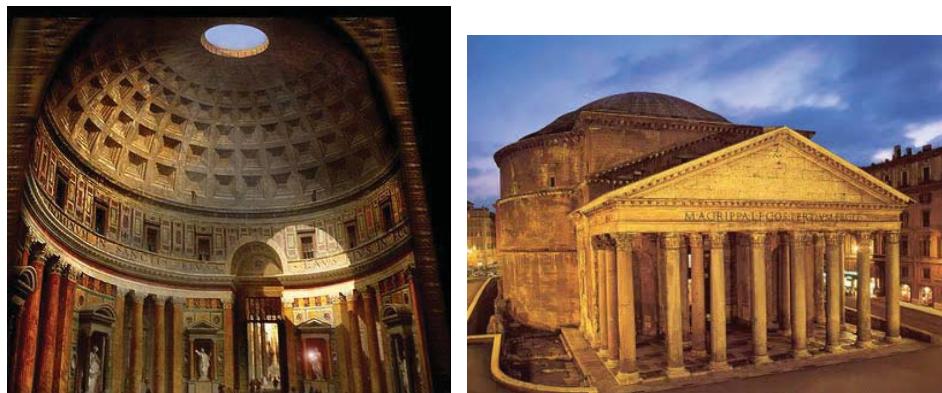


Figura 2 - Vista interior y exterior del Panteón.

En el nivel inferior de la *rotonda* se abren ocho amplias exedras de planta trapezoidal y semicircular alternativamente (ver Figura 3). Los nichos están enmarcados por un orden de pilastras y de columnas, con un entablamento corrido en todo el perímetro, excepto en las exedras del eje principal (Figura 2). En éstas, cubiertas mediante bóvedas, el entablamento se interrumpe ya que las columnas intermedias no son necesarias. Entre las exedras, en los paños de muro intermedios, aparecen edículos con capialzados triangulares y circulares alternados (Figuras 1-3). En un segundo nivel, desde el entablamento hasta la imposta de la bóveda, hay una fila de ventanas, alineadas en vertical con los nichos y los edículos, que abren a una galería superior. La decoración romana original fue sustituida en el siglo XVIII por la que se puede ver actualmente. El sector sudoccidental ha sufrido varias restauraciones, no del todo apropiadas, que han alterado el aspecto inicial. El pavimento de mármol de la *rotonda* es ligeramente convexo, con la parte central 30 cm más alta que el perímetro, para evacuar la lluvia que entra por el oculus hacia el canal perimetral. El revestimiento es de baldosas con un diseño de cuadrados en los que se inscriben alternativamente cuadrados y círculos más pequeños.

La cúpula está formada en el interior con cinco filas de casetones, que decrecen en tamaño hacia el centro, donde está perforada por un oculus abierto de 9 m de diámetro. El oculus estaba rodeado por una cornisa de bronce fijada a la cúpula en la última fila de casetones. Las oquedades en la fábrica sugieren que tanto los casetones como el espacio intermedio estaban forrados de bronce. Al exterior, la cúpula arranca de una sobre-elevación del muro, a 8,40 m por encima del arranque interior de la bóveda. Se encuentra articulada por medio de siete anillos superpuestos, el inferior de los cuales conserva todavía el revestimiento de mármol. El resto se encontraba cubierto por planchas de bronce dorado, hoy perdido a excepción del perímetro del oculus.

Los principales materiales de acabado del espacio son por tanto el hormigón aligerado en la parte superior de la cúpula y pesado en la inferior, el mármol pintado dispuesto en la pared cilíndrica de la *rotonda* y pulido en suelo y columnas (ver Tabla 1).

Desde la inauguración del Panteón por Adriano, se sabe de una reparación realizada por Antonino Pío en el año 140. Por otra parte, una inscripción recuerda otra restauración a cargo de Septimio Severo en 202. En el siglo IV, con la caída del imperio romano, la ciudad de Roma inicia su decadencia y en el año 399 el Panteón fue cerrado al culto. El edificio se salvó de la destrucción al principio de la Edad Media porque en el año 608 fue donado por el emperador Bizantino Foca al papa Bonifacio IV. En el año 609, el papa lo consagró pasando a denominarse Santa María de los Mártires. En años posteriores,

Acústica 2012, 1 a 3 de Outubro, Évora, Portugal

el edificio sufrió explolios en el revestimiento de bronce de su cúpula y se realizaron una serie de modificaciones en la zona del ábside del lado sur con la construcción de un pasadizo. A partir del año 663, se comenzó a denominar Santa María Rotonda y durante siglos fue la única iglesia de la zona oriental del centro de la ciudad.

Entre los siglos VII a XII se restaura la cubierta de plomo de la cúpula y la imagen de Roma se identifica con diversos edificios, entre ellos el Panteón, a la vez que se proyecta la construcción de un palacio pontificio adosado. En el siglo XIII se añade un pequeño campanario en el vértice del tejado del frontón del pórtico, formando parte de la imagen del Panteón durante todo el Renacimiento. En el siglo XV se pone en valor la recuperación de lo antiguo, y el Panteón es enriquecido con frescos: el más notable el de *La Anunciación* de Melozzo da Forlì, en la primera capilla a la derecha de la entrada. La elección de Rafael como lugar de ubicación de su tumba (1520) hacer pensar sobre el pleno reconocimiento que alcanzó el edificio, transcendiendo en su dimensión urbana, y comenzando a ser valorado en su esencia. En 1576 se urbanizó la plaza frente al Panteón, y en 1632 se ordenó el proyecto de los campanarios simétricos en sustitución del preexistente.

En el siglo XVIII se sistematizan las tareas de mantenimiento, restauración e investigación del Panteón. En 1740 se modifica el aspecto original del cuerpo intermedio del interior del Panteón dotando a los huecos del mismo de un frontón que no poseía en su estado original y se eliminó la decoración de los espacios entre dichos huecos. En 1823 el papa Pío IX ordena la restauración de su pavimento interior y se inicia la liberación del Panteón de las construcciones adosadas, que se culmina en 1898, coincidiendo con la demolición de los dos campanarios. Con estas operaciones el edificio se monumentalizó y se erigió en protagonista de su entorno urbano. A finales del siglo XIX se instalan las tumbas de los reyes de la dinastía de Saboya Víctor Manuel II, y Humberto I en dos exedras opuestas. En 1993 comienzan las tareas de limpieza y restauración del interior del Panteón con la intención de recobrar el aspecto original del edificio bajo el interés cromático por los materiales con los que se construyó.

No sería posible terminar esta breve reseña sin hacer referencia a la enorme trascendencia que el Panteón ha tenido en la arquitectura occidental. Durante el Renacimiento, los artistas y arquitectos que volvieron los ojos hacia la antigüedad clásica no podían pasar por alto uno de los edificios más bellos y mejor conservados de Roma. Brunelleschi estudió el Panteón para la construcción de la cúpula del Duomo de Florencia, punto de partida de la arquitectura renacentista. Bramante y Miguel Ángel lo

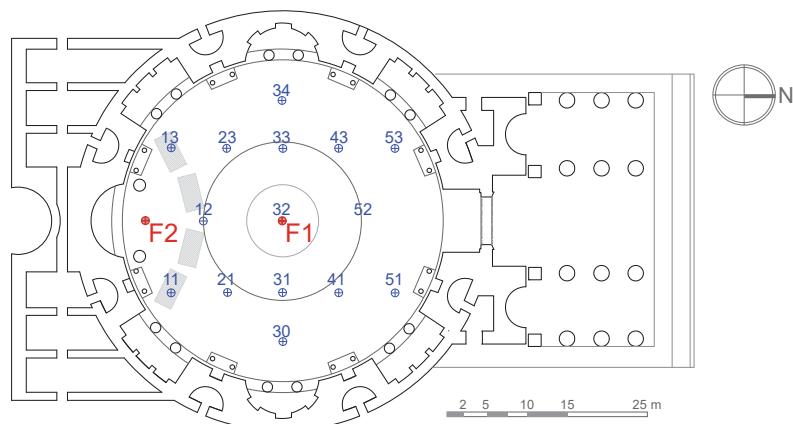


Figura 3 – Plano de planta con las posiciones de la fuente (F), de los receptores y la zona de bancos sombreada en gris.

recrearon en obras como el Templete de San Pietro en Montorio o la Basílica de San Pedro. Durante el neoclasicismo italiano, Antonio Canova proyectó un templo en Possagno, basándose en el diseño del Panteón. Su influencia se deja notar en Inglaterra y América del Norte, gracias a Andrea Palladio, que fue muy imitado hasta el siglo XIX. Muchas salas cívicas, universidades y bibliotecas reutilizan la forma de cúpula con pórtico: la iglesia del cementerio monumental de Staglieno, la Iglesia de San Francisco de Paula en Nápoles, la villa Capra de Vicenza, la *rotonda* de Thomas Jefferson de la Universidad de Virginia, la biblioteca de la Universidad de Columbia, el edificio principal de la National Gallery de Washington o la Biblioteca del Estado de Victoria en Melbourne son algunos destacados ejemplos.

3 Simulación Acústica

El software utilizado para la simulación es CATT-Acoustic, en su versión 9.0, con el motor de cálculo TUCT (The Universal Cone Tracer) versión 1.0 utilizando los algoritmos E y h, desarrollados por CATT para la simulación acústica y auralización de recintos. El programa fundamenta su método híbrido en un trazado de conos que incorpora un proceso aleatorio de corrección de la cola reverberante (*randomized tail-corrected cone-tracing, RTC*), combinando en él características del trazado de conos con reflexiones especulares (*specular cone-tracing*), el trazado de rayos convencional (*standard ray-tracing*) y el modelo de las fuentes imagen (*image source model, ISM*). La aplicación informática ha demostrado ser robusta para la predicción de los valores de los diferentes parámetros acústicos, así como para la creación de respuestas al impulso binaurales que puedan ser usadas en auralizaciones.

El modelo 3D del recinto (Figura 4) consta de 568 planos y tiene un volumen de 49.172 m³. En él se han utilizado dos posiciones de la fuente omnidireccional y 15 posiciones de recepción (ver Figura 3). Asimismo los materiales del recinto con sus correspondientes coeficientes de absorción y dispersión introducidos en el modelo, se han detallado en la Tabla 1.

En consonancia con el carácter académico original del trabajo, la simulación acústica se ha iniciado con el ensayo de la convergencia de la misma en función del número de rayos lanzados y el tiempo de truncado, con este fin se han estudiado cuatro simulaciones analizando los resultados de los parámetros acústicos T_{30} , C_{80} , D_{50} , G y J_{LF} , definidos en [14], en tres de los receptores (11, 32, y 53), y posición de la fuente F1, utilizando el motor TUCT algoritmo 1 (*split-order 0*) bajo 300.000, 500.000, 1.000.000 y 2.000.000 rayos, en todos los casos con un tiempo de truncado de 18 s y considerando la absorción del aire del recinto. Las mayores diferencias de los resultados corresponden al parámetro J_{LF} y se ha constatado que el valor óptimo que incluye compromisos de estabilidad, precisión y economía de tiempo de cálculo corresponde a realizar la simulación con 500.000 rayos.

A continuación, se han analizado las diferencias encontradas utilizando la herramienta CATT y los algoritmos 1 y 2 de TUCT. Con este fin, se han calculado los valores de los parámetros citados anteriormente en los mismos receptores (11, 32, y 53) con la fuente F1, y se estudiaron sus diferencias. Los resultados obtenidos muestran que las únicas diferencias significativas (>1 JND) tuvieron lugar en el parámetro J_{LF} . Estas valoraciones han sugerido llevar a cabo el estudio con el algoritmo 1 TUCT (E) para la obtención de los parámetros acústicos omnidireccionales y TUCT (h) para los direccionales y binaurales, respectivamente.

Finalmente, en este contexto académico, se estudió la influencia de la absorción de la energía sonora por el aire en este gran recinto reverberante, que se pone de manifiesto en casi todos los parámetros

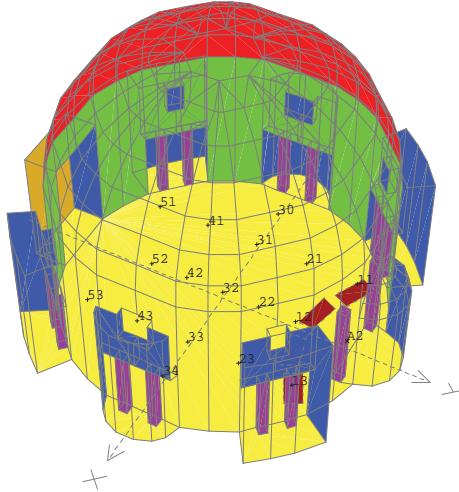


Figura 4 – Modelo 3D creado para la simulación acústica del Panteón de Roma.

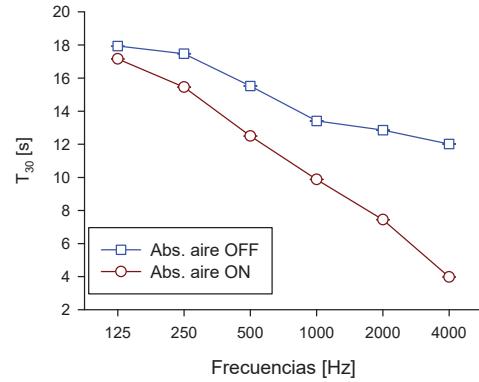


Figura 5 – Valores espectrales en bandas de octava de T_{30} , promediados espacialmente, para la fuente F1 sin considerar y considerando la absorción del aire.

acústicos, en especial a medias y altas frecuencias. Como indicador de este efecto se muestra en la Figura 5 los resultados correspondientes al tiempo de reverberación.

Tabla 1 – Coeficientes de absorción (fila superior) y dispersión (fila inferior), en % por bandas de octava, de los materiales del modelo acústico.

Material	Área [m ²]	Área [%]	Banda de octava (Hz)						Color (Fig. 4)
			125	250	500	1 k	2 k	4 k	
Puerta de bronce	151,8	1,6	15	11	10	7	6	6	Yellow
			12	12	12	12	12	12	Red
Cúpula de hormigón	1742,1	18,3	6	6	7	8	9	10	Orange
			20	30	40	50	50	50	Green
Cúpula de hormigón aligerado	673,0	7,1	6	6	7	8	9	12	Blue
			20	30	40	50	50	50	Black
Columnas de mármol	655,6	6,9	1	1	1	2	2	2	Yellow
			20	30	40	50	55	60	Red
Paredes <i>rotonda</i> de mármol pintado	1883,0	19,8	1	1	1	2	2	2	Orange
			15	20	25	30	30	30	Green
Suelo de mármol	1531,0	16,1	1	1	1	2	2	2	Blue
			15	20	25	30	30	30	Black
Audiencia para visita turística	1531,0	16,1	10	21	41	65	75	71	Yellow
			30	40	50	60	70	70	Red
Nichos pintados	2778,9	29,2	8	9	11	12	12	12	Blue
			15	15	15	15	15	15	Black
Óculo	50,4	0,5	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	Black
Zona de bancos desocupado*	39,0	0,4	16	18	18	17	17	16	Red
Zona de bancos ocupados*	39,0	0,4	30	40	50	60	70	80	Red

Datos de los materiales procedentes de Ref. [15] y los marcados con* Ref. [16].

4 Resultados y Discusión

Se ha realizado la simulación con dos posiciones de la fuente, F1 localizada en el centro de la *rotonda* (coincidente con el receptor 32), y F2 en el extremo sur del edificio, diametralmente opuesto a la puerta de acceso a la *rotonda*, y que según la información disponible corresponde a la posición donde se sitúa el orador para ceremonias religiosas y civiles que tienen lugar en el espacio, y próxima a una reducida zona de bancos (Figura 3).

El estudio espectral de los parámetros acústicos T_{30} , EDT, T_s , C_{80} , D_{50} , J_{LF} , G e IACC_E, se ha realizado para las dos posiciones de la fuente mencionadas, en la situación de espacio desocupado y con ocupación turística (la audiencia ocupa toda la plana, ver Tabla 1). Además, con la fuente en posición F2, se ha considerado un tercer grado de ocupación que corresponde a la presencia de público sólo en la zona de bancos (zona sombreada en la Figura 3). Los resultados obtenidos para la configuración de la fuente en F1 no se han mostrado, si bien cabe destacar que no existen diferencias significativas en cuanto al comportamiento en frecuencia y magnitud de los mostrados en la Figura 6 para la fuente F2, a excepción de los parámetros J_{LF} e IACC_E; diferencias éstas que analizaremos más abajo en términos de los resultados obtenidos promediados en frecuencia, en los diferentes receptores. También en relación a los resultados obtenidos con la fuente F1 se aprecia una menor dispersión espacial de los valores de los parámetros, valorada en términos del error estándar, que en el caso de F2, y un cambio de los resultados similar al obtenido con F2 cuando se considera que la audiencia ocupa toda la planta.

Con objeto de cuantificar estas diferencias en los valores de los parámetros acústicos con el grado de ocupación en las dos posiciones de la fuente, en la Tabla 2 se presentan los valores medios de las diferencias en todos los receptores y el error estándar asociado de cada parámetro (promediados espectralmente de acuerdo con ISO [14]), valorados en términos de los valores umbrales de discriminación subjetiva (JND de cada parámetro según indica ISO [14] y Martellotta [17] para C_{80} y T_s en grandes espacios reverberantes). Los datos exponen que la influencia de la presencia del público es notable en el espacio, en particular para los parámetros temporales y con escasa dispersión espacial. No se presentan las diferencias obtenidas para el supuesto de ocupación de bancos debido a que apenas existen variaciones entre estos y los valores medios de los parámetros obtenidos con el templo desocupado (ver Figura 6).

En cuanto a los resultados de la Figura 6 (simulados con F2), se muestra el comportamiento espectral de los parámetros estudiados correspondiente a tres situaciones: desocupado, ocupación total de la planta (turística) y ocupación parcial (solo los bancos). Nótese cómo la ocupación de la escasa zona de bancos no supone un cambio sustancial en las propiedades acústicas del espacio con respecto al estado desocupado.

También en relación a la Figura 6 cabe destacar cómo los parámetros omnidireccionales presentan muy escasa dispersión espacial (análogos resultados se han obtenido en F1, no mostrados), en especial para los omnidireccionales temporales, T_{30} , EDT, T_s , siendo en particular para T_{30} la dispersión del orden del milisegundo. Las mayores dispersiones espaciales en los parámetros omnidireccionales se

Tabla 2. Diferencias medias en términos de JND para cada parámetro, entre espacio desocupado y con ocupación turística.

	T_{30}	EDT	T_s	C_{80}	D_{50}	J_{LF}	G	IACC _E
F1	Media	10,17	9,80	6,19	2,12	2,44	0,50	3,96
	Err. std.	0,01	0,06	0,07	0,07	0,15	0,12	0,08
F2	Media	10,21	9,94	5,97	1,77	1,62	0,48	3,80
	Err. std.	0,01	0,03	0,09	0,10	0,21	0,10	0,11

Acústica 2012, 1 a 3 de Outubro, Évora, Portugal

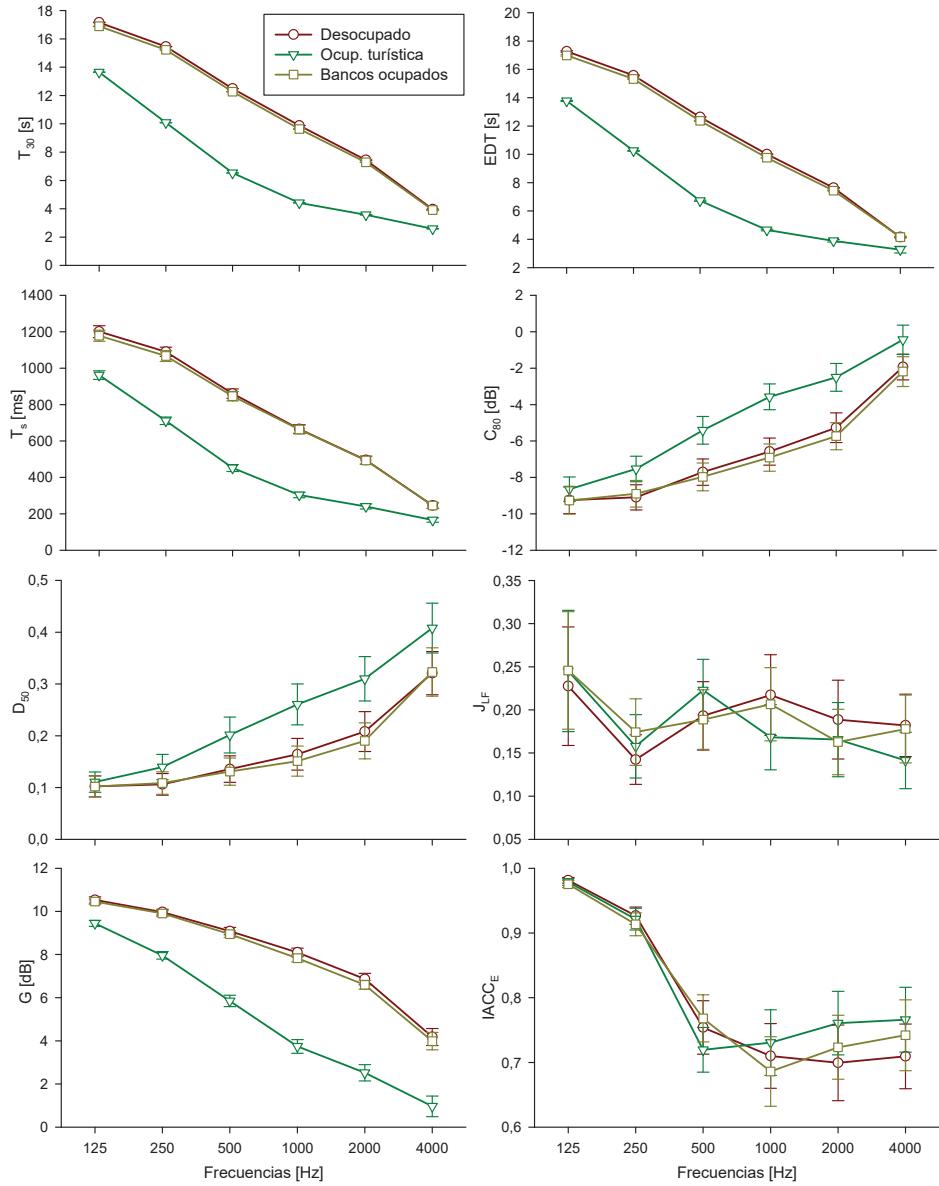


Figura 6 – Valores espectrales de los diferentes parámetros acústicos estudiados, para la posición de fuente F2, con los diferentes grados de ocupación.

alcanzan para C_{80} , D_{50} . Merece la pena resaltar los bajos valores del parámetro relacionado con la inteligibilidad de la palabra D_{50} en el estado desocupado, con valor único en el espacio 0,12 (inteligibilidad mala) y que con la ocupación pasar a ser 0,22 (inteligibilidad pobre). Aunque la simulación proporciona resultados del parámetro STI no se han aportado al no tener datos experimentales del ruido de fondo en el espacio.

Se observan notables y perceptibles variaciones espaciales en el parámetro direccional J_{LF} y el binaural $IACC_E$ para las dos posiciones de la fuente. Además para la posición central de la fuente (F1) se

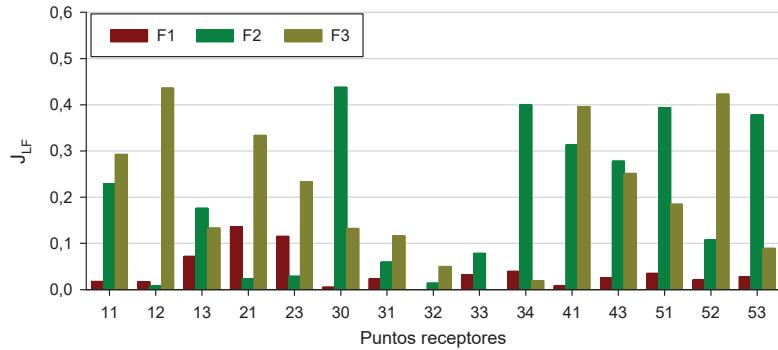


Figura 7 – Valores promedio espectral de J_{LF} en los diferentes puntos de recepción para las tres posiciones de la fuente en estado desocupado.

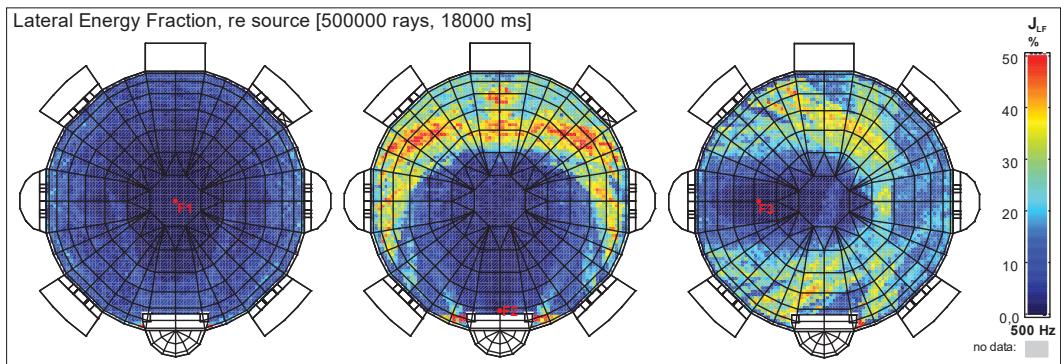


Figura 8 – Mapeados de J_{LF} a 500 Hz en las tres posiciones de la fuente F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha), en estado desocupado.

observaron valores muy pequeños de J_{LF} aparentemente relacionados con el hecho de que en esa posición predominan las reflexiones radiales y escasean las laterales cuando los receptores miran a la fuente. Con objeto de poner de manifiesto estos aspectos, se colocó una tercera fuente en la posición del receptor 33 de la Figura 3. En la Figura 7 se muestran los resultados de J_{LF} (promediados en las bandas de 125-1000 Hz [14]) para las tres posiciones de la fuente. Adviértase como se pone de manifiesto lo que acabamos de comentar respecto a la dispersión y a las reflexiones radiales para F1. En la posición F2 los valores del parámetro se incrementan notablemente, en particular para los receptores próximos a las paredes laterales (11, 13, 30, 34, 41, 43, 51, y 53) pero no en los ubicados en el diámetro donde está la fuente. Este efecto queda corroborado al observar los valores para la posición F3: en esta situación desciende la energía lateral precoz en los receptores 30, 31, 32 y 34, respectivamente alineados en el diámetro de la fuente. Estos efectos también se pueden apreciar al hacer el mapeado del parámetro sobre la zona de audiencia como se muestra en la Figura 8.

Como complemento a todo lo aportado en relación a la simulación realizada en este emblemático espacio arquitectónico, en la Figura 9 se muestran la primera parte (500 ms) de la respuesta al impulso binaural proporcionada por el software en el receptor 52 con la fuente F2, con ocupación turística correspondiente. Esta y otras se han utilizado para recrear la percepción sonora en el recinto mediante auralizaciones de mensajes orales y musicales.

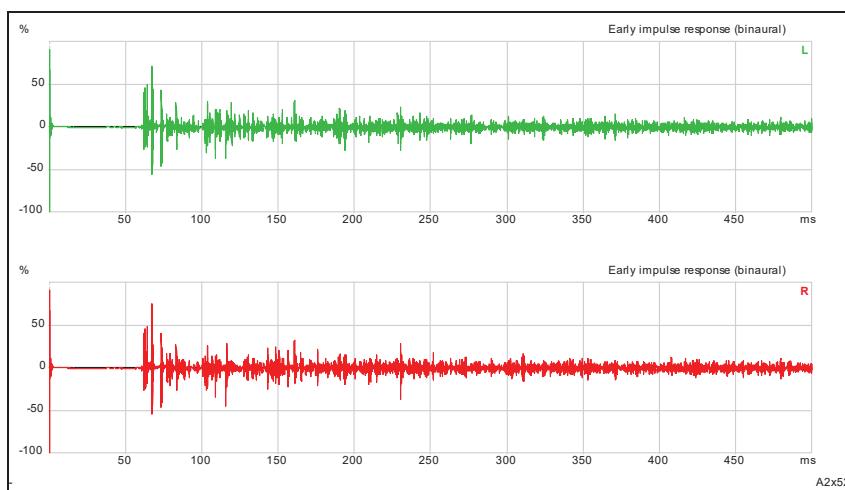


Figura 9 – Parte inicial de la respuesta al impulso binaural para el receptor 52, con la fuente F2 y configuración de ocupación turística.

5 Conclusiones

Que conozcamos no se han publicado medidas acústicas objetivas en este emblemático espacio y por lo tanto la simulación no ha podido validarse por contraste con resultados reales, no obstante los resultados virtuales alcanzados en este trabajo han puesto de manifiesto comportamientos acústicos esperados del diseño cilíndrico con paredes reflectantes. Los tiempos de reverberación son elevados (a frecuencias medias, del orden de 11 s en estado desocupado, y 5,5 s con ocupación turística) como corresponde a gran volumen en planta circular con cúpula, disminuyendo con el grado de ocupación donde se aprecian disminuciones del orden de diez veces su valor umbral diferencial.

Los parámetros omnidiireccionales no muestran variación en magnitud al cambiar la posición de la fuente excepto C_{80} un leve cambio, como consecuencia de la redistribución de la energía precoz omnidiacional relacionada con la simetría radial y en general hay menos variaciones espaciales en los resultados de los parámetros para la fuente en posición F1 que en F2. Un notable cambio en magnitud si es obtenido en los parámetros direccionalles relacionados con la impresión espacial y que valoran la energía lateral precoz, desapareciendo estas aportaciones cuando la fuente se sitúa en el centro de la *rotonda* por la imposibilidad de llegar a los receptores energía acústica lateral precoz como consecuencia de la simetría central. Se han cuantificado las variaciones de los parámetros acústicos con la presencia de público en visita turística respecto al estado desocupado obteniéndose cambios notoriamente perceptibles en todos los parámetros omnidiireccionales, si bien en los parámetros direccionales y binaurales este cambio es más moderado.

Anexo de términos arquitectónicos:

Períptero: Se dice del templo clásico rodeado por columnas que deja paso entre estas y el muro.

Cella: Espacio interior, que constituye el núcleo de la construcción en los templos griegos y romanos, y comunica por uno de sus lados con el pronaos o pórtico.

Rotonda: Templo, edificio o sala de planta circular.

Pronaos: En los templos antiguos, pórtico que había delante del santuario o cella.

Octóstilo: Que tiene ocho columnas.

Exedra: Construcción descubierta, de planta semicircular, con asientos fijos en la parte interior de la curva, y respaldos también permanentes.

Edículo: Edificio pequeño. Templete que sirve de tabernáculo, relicario, etc.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por los autores con el equipo del proyecto BIA2010-20523, financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación español.

Referencias

- [1] San Martín, R.; Arana, M. Predicted and experimental results of acoustic parameters in the new Symphony Hall in Pamplona, Spain. *Appl. Acoust.* 67, 2006, 1-14.
- [2] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2009, 1207-1218.
- [3] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2009, 1175-1186.
- [4] El Khateeb, A.; Refat, M. Sounds from the past: the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrasa. *Build. Acoust.* 14, 2007, 109–132.
- [5] Vassilantonopoulos, S. L.; Mourjopoulos, J. N. A study of ancient Greek and Roman theater acoustics. *Acta Acust. Acust.* 89, 2003, 123–136.
- [6] Martellotta, F.; Della Crociata, S.; D'Alba, M. On site validation of sound absorption measurements of occupied pews. *Appl. Acoust.* 72, 2011, 923-933.
- [7] Summers, J. E.; Torres, R. R.; Shimizu, Y. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 116(2), 2004, 958–969.
- [8] Martellotta, F. Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *J. Sound Vib.* 317, 2008, 378-399.
- [9] Garrido, J. A.; Zamarreño, T.; Girón, S. Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. *Appl. Acoust.* 73, 2012, 921–935.
- [10] <http://grupo.us.es/gteacus/> (visitada el 10/07/2012).
- [11] <http://institucional.us.es/acuscate/> (visitada el 10/07/2012).
- [12] Giménez, A.; Segura, J.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Barba, A.; Montell, R.; Planells, A.; Navasquillo, J.; Romero, J.; Ponz, S.; Lacatis, R.; Fernández, M.; Miralles, J. L. Estudio acústico de edificios del patrimonio histórico arquitectónico en entornos de realidad virtual. Dificultades y ventajas. Proceedings of TecniAcústica2011, Cáceres 26-28 de octubre de 2011, (CD-ROM) ISBN: 978-84-87985-20-1.
- [13] Montero-Fernández, F. J. *El Panteón: Imagen, tiempo y espacio. Proyecto y patrimonio*, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla, 2004.
- [14] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [15] Vörländer, M. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [16] Cox, T. J.; D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*, Spon, London, 2004.
- [17] Martellotta, F. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 2010, 654-663.

Appendix 3: Using 3D sound field information as an instrument to improve the accuracy of virtual acoustic models

(TecniAcústica2014)

As broadly described in *Chapter 3*, when creating virtual acoustic models of existing spaces, a careful calibration procedure through comparison with on-site acoustic measures is highly recommendable. This process starts with a comparison of a reference acoustic parameter (usually reverberation time), followed by a point-by-point comparison between measured and simulated acoustic parameters and, at those points where the agreement is insufficient, also between impulse responses, which is necessary to identify which sound reflections are responsible for the inaccuracy in the simulated values.

As stated before, a significant help towards the improvement of the quality of the acoustic simulation comes from the additional spatial information resulting from the use of 3D sound field measurements.

The work presented in this appendix discusses how such an innovative approach can be conveniently used with reference to the modelling of the Jubilee Church “Dives Misericordiae” in Rome, by the architect Richard Meyer. The complex shape of the church, made of concave shells, represents an ideal case study to test how surface discretization and model simplification may influence final results.



**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

**USING 3D SOUND FIELD INFORMATION AS AN INSTRUMENT TO
IMPROVE THE ACCURACY OF VIRTUAL ACOUSTIC MODELS**

PACS: 43.55.Ka

Álvarez-Morales, L.¹; Martellotta, F.²

¹ Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain. Tel.: + 34 954555979. Fax: +34 954557892.
e-Mail: calvarez6@us.es

² Politecnico di Bari, Dipartimento ICAR,
Via Orabona, 4, 70125 Bari, Italy. Tel: +39 0805963631 Fax: +39 1782274632.
e-Mail: francesco.martellotta@poliba.it

ABSTRACT

When creating virtual acoustic models of existing spaces, a good practice requires a proper calibration procedure, through comparison with on-site acoustic measures. This process starts with a comparison of a reference acoustic parameter (usually reverberation time). However, matching reverberation times does not ensure a good matching of the other parameters. From this point of view comparison between measured and simulated impulse responses is necessary to identify which sound reflections are responsible of the inaccuracy. A significant help to improve the quality of the acoustic simulation, comes from the additional spatial information resulting from the use of 3D sound field measurements. The paper discusses how such innovative approach can be conveniently used with reference to the modelling of the Jubilee Church "Dives Misericordiae" in Rome, by architect Richard Meyer. The complex shape of the church, made of concave shells, represents an ideal case study to test how surface discretization and model simplification may influence final results.

RESUMEN

Crear modelos acústicos virtuales de espacios ya construidos requiere un procedimiento de calibración adecuado, basado en las medidas acústicas realizadas in-situ. Este proceso comienza con la comparación de un parámetro acústico de referencia (por lo general el tiempo de reverberación). Sin embargo, igualar los tiempos de reverberación no asegura una buena adaptación de los otros parámetros, y se hace necesario comparar las respuestas al impulso medidas y simuladas para identificar cuáles son las reflexiones del sonido responsables de estas diferencias. La información espacial resultante de las mediciones 3D del campo sonoro, resulta de gran ayuda a la hora de mejorar la calidad de la simulación. En este documento se analiza cómo este enfoque innovador puede ser utilizado, mostrando como ejemplo la modelización de la Iglesia "Dives Misericordiae" de Roma, diseñada por el arquitecto Richard Meyer. Su compleja forma la convierte en un caso de estudio ideal para probar cómo la simplificación del modelo puede influir en los resultados finales.



**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

INTRODUCTION

The field of virtual acoustics offers the possibility of studying and recreating the acoustic behaviour of a room, which proves highly useful as a tool both for design and evaluation, either for research or consultancy purposes. Its advantages have been commonly used in theaters and concert halls [1, 2], but also in other types of buildings [3, 4].

Standard computer programs used algorithms fundamentally based on geometrical acoustics (introduced by Schroeder et al. in 1962 [5]) for its calculations: ray tracing [6], sound images or hybrid methods [7]. All of them are ray-based methods, in which the simplification broadly consists of the definition of sound rays, which are supposed to propagate from the source to the receiver in a rectilinear path through a homogeneous medium, either directly or reflected after every collision with the room boundaries. The energy decreases as a consequence of path length, collisions with walls, and air absorption, but the effects of the energy phase are ignored. In addition, several sound effects such as diffraction or interference are neglected or difficult to model, despite some algorithms have been modified in order to incorporate any of the typical wave phenomena as scattering or diffraction at the edges [8, 9, 10]. Furthermore, this simplification is not useful for the low frequency range, so that according to this theory, the corresponding predictions are only valid above the Schroeder frequency of the room which can be calculated as a function of its reverberation time and its volume: $f_s = 2000\sqrt{(T/V)} \text{ [Hz]}$.

Despite these limitations commonly associated with geometric models, acoustic simulation softwares are capable of simulating the room impulse response (RIR) of a specific source-receiver combination from which time, frequency and direction details of the sound energy that reaches the receiver, can be deduced. An essential part of the simulations is the 3D computational acoustic model. It is important to decide how precise the description of the enclosure should be and what kind of simplifications could be assumed, since this can affect directly the accuracy of the results.

When dealing with existing buildings, computer modelling can be used to construct a virtual representation of a site for a particular set of circumstances. To this end, the model can be refined applying a calibration procedure which normally consists of the comparison between simulated and measured results [11]. This step is very important as it is always very difficult to know exactly the surface characteristics (particularly when dealing with historical buildings). Acoustics simulation programs require both absorption and scattering coefficients which should also compensate for the unavoidable (recommended) simplifications of the 3D model [12]. Educated guesses are sometimes necessary (particularly for scattering coefficients), but if on-site measurements are available the process can be considerably simplified by proper comparison with a reference acoustic parameter (usually reverberation time), and then with all the others. However, matching reverberation times does not ensure a good matching of the other parameters. Some fine tuning is often required to obtain the optimal results, and comparison of measured and simulated impulse responses become necessary in order to identify which sound reflections are responsible of the inaccuracy, which may sometime result from incorrect source or receiver placement, or, more frequently, to modelling issues specific of given surfaces.

At this point, the 3D sound field information (which can be obtained either by means of simple Ambisonic microphones or by more sophisticated multichannel arrays) can be essential for detecting such problems and therefore improve the quality of the acoustic simulation [12]. During the fine tuning process the additional spatial information may be very useful to check the differences between real and simulated environment, leading to a faster and more accurate matching between the two.

This paper discusses how such innovative approach can be conveniently used with reference to the modelling of the Jubilee Church "Dives Misericordiae" in Rome, by architect Richard Meyer.

45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA 8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

DESCRIPTION OF THE CHURCH

The Catholic Jubilee Church "Dives in Misericordia", formally known as "Chiesa di Dio Padre Misericordioso", designed by architect Richard Meier, is located in the eastern suburban area of Rome, bringing new cultural life to this zone. The modern church (consecrated in October 2003) is conceived as a composition of basic elements based on the contrast of cubes and spheres and on the in-between spaces and connections, combined with the dramatic use of light both outside and inside.

Its exterior is characterized by the three enormous white shells that symbolize the Trinity, made of prefabricated self-sustaining concrete panels and in graduated heights (See Fig.1). The light penetrates the building through the roof between the shells, and also through the entrance façade and the west and east walls (altar and organ walls respectively) which are light glazing, according to the season, the time of the day and the weather. In the interior, the distribution of different spaces is made clear by physical separations. The main nave is an almost rectangular space (See Fig. 2) concluded by the chancel characterized by the minimalist design of the altar placed off the central axis, of the lectern, and of the seat all sculpted in travertine marble blocks. The organ and the choir are located above the entrance, mounted on another prism which surfaces and edges are broken in order to create a transparent virtual volume. The only variety out of white tone is given by the wall opposite the sails, covered with wooden slats, which provides warmth to the space. The materials in the Jubilee church are restrained: traditional Roman travertine for the floor; concrete facing, marble and light wood panelling for walls; glazed skylights for ceiling and windows; and thick wooden pews.

The simple style of the room and the use of curved smooth surfaces and flat finishings together with the low-acoustic-absorption materials used, minimize the scattering in the enclosure, making easily readable the sequence of early reflections and echoes, which make this space an ideal case of study to test how surface discretization and model simplification may influence final results and to apply the proposed methodology.

ACOUSTIC MEASURES

The on-site acoustic measurements were carried out using an omni-directional dodecahedron sound source (Lookline D301), together with an additional subwoofer in order to improve the low-frequency response. The excitation signal was a 40 s equalised sine sweep with a suitable length to ensure a sufficient signal-to-noise ratio throughout the spectrum of interest. Monaural, binaural (B&K 4100D) and B-format (Soundfield MK-V) microphones were used to get the impulse responses (IRs) from which the main acoustic parameters were calculated. All the instruments and the procedures were complying with ISO standard 3382-1 [14] and with church-specific guidelines [15]. The sound source was located in two positions in front of the altar and



Figure 1. Exterior (above) and interior views of the church from the main entrance (below, left) and detail of the choir (below, right).

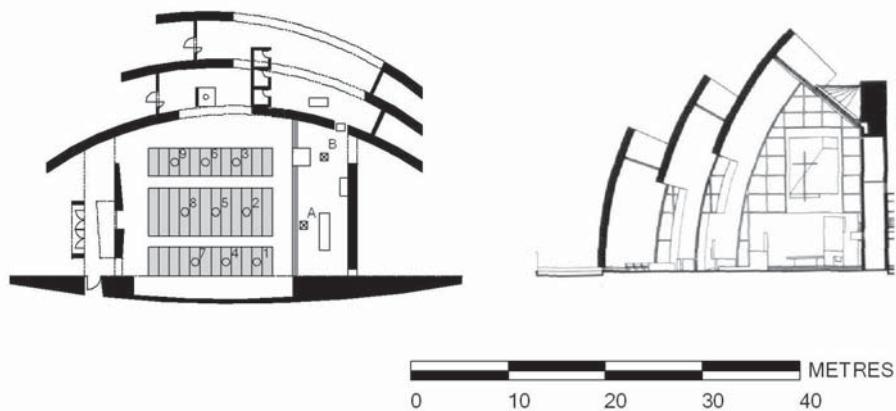


Figure 2. Plan and cross section of the church.

behind the lectern, whereas nine receiver points were distributed throughout the area normally covered by the pews and/or by the standing congregation (See Fig. 2). A summary of the room averaged acoustic parameters is given in Table 1 [16].

Table 1. Summary of acoustic data of the church: Spatial and Spectral averaged parameters.

Acoustic Parameters	Frequency averaging ^a [Hz]	Units	Value
Reverberation time, $T_{30,m}$	500 – 1000	s	7.288
Early Decay Time, EDT_m	500 – 1000	s	7.115
Sound strength, G_m	500 – 1000	dB	13.606
Definition, $D_{50,m}$	500 – 1000	-	0.105
Central time, $T_{S,m}$	500 – 1000	ms	512.143
Clarity, $C_{80,m}$	500 – 1000	dB	-8.739
Early Lateral energy Fraction, $J_{LF,m}$	125 – 1000	-	0.304
Early interaural cross-correction coefficient, $IACC_{E,m}$	500 – 2000 ^b	-	0.343

^aArithmetical averaged for the octave bands according to ISO 3382-1 [14].

^bArithmetical averaged for the octave bands according to Okano et al. [17].

ACOUSTIC SIMULATION

The software used for the acoustic simulation is CATT-Acoustic v.9.0.a [9]. The acoustic calculations were carried out by using the TUCT (The Universal Cone Tracer) engine where the acoustic parameters were obtained through processing echograms (E) and by processing the impulse response (h) algorithms. Specifically, the algorithm for closed-room "short calculation, basic auralization" with a "max split order" 1 was used, which determined the number of rays per cone automatically (40,660) for parameter calculation, and the truncation time of the length of the impulse response was set at 8 seconds, according to the measured reverberation time in the church. It is important ensure that the numbers of rays and the length of the response set for the simulation were enough to obtain a sufficient number of detected reflections.

A simplified 3D geometrical model of the church was created in order to perform the simulations. The absorption coefficients were first assigned considering usual literature values, combining them with those resulting from documented simulations of similar buildings. It is no easy to recreate the acoustic behaviour of the room with an initial model, and an adjustment become necessary to compensate the simplifications and also adapt the coefficients which describes peculiar materials or complex surfaces.

**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

Acoustic Model Calibration

According to the usual approach, when working with existing buildings, the validation of the 3D acoustic model require a comparison between the reverberation time measured on site and the simulated values, so that they differ by no more than 1 JND (variation of 5% from the measured value). This procedure consists of an iterative adjustment of the absorption and scattering coefficients of the most uncertain materials or surfaces, possibly covering large areas so that small variations from the originally assigned values could lead to a better agreement between simulated and measured parameters. Once this requirement is matched, it is highly recommendable working with the other parameters, point by point, in order to be sure that the early reflections are being properly simulated. To that end, variations above 2 JND between measured and simulated values are considered too wide, and a refinement of the model is required. Analysing the omnidirectional impulse responses, we are able to study if the simulated reflections are present in the measured responses and we can compare their arrival time and their intensity, or, conversely, if some reflexions are missing. The difficult part is to determine where those reflections come from, and consequently modify that part of the model. Modifications could imply changes in some coefficients of the materials and/or in the simplifications assumed in the model.

Figure 3 depicts the geometrical 3D model implemented for the church adjusted according to the methodology explained before. This model has 744 planes, an approximate total volume of 10,700 m³. Table 2 shows the initial absorption coefficients from 125 to 4000 Hz octave bands. The scattering coefficients depend on the degree of decoration and irregularities of each surface.

As can be seen in Table 3, the results obtained with the simulation are good enough for the majority of the parameters at the majority of the octave bands (JND differences < 2). Nevertheless, at certain receiver points some parameter values are not in agreement, leading to the highest differences.

Furthermore, an objective evaluation by using acoustic parameters is not sufficient to determine the validity of the model, and a subjective evaluation by making listening test is highly recommended.

Table 2. Absorption coefficients used in the initial model.

Materials	Area (%)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Lime cement plaster	50.1	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05
Glass	23.0	0.15	0.08	0.04	0.03	0.02	0.02
Marble	15.9	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Wooden slats ^c	5.2	0.35	0.25	0.20	0.02	0.02	0.02
Pews	4.5	0.01	0.03	0.06	0.06	0.05	0.06
Plywood panelling	0.2	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Solid wooden door	0.1	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10

^cValues resulting from iterative calibration

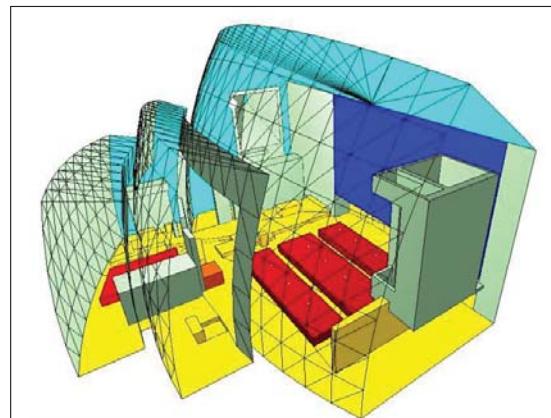


Figure 3. Geometrical 3D model created to simulate the acoustics of the church.

Table 3. Mean differences in terms of JND calculated point-by-point between measured and simulated values after model calibration applying the usual approach.

Acoustic Parameters	JND ^d	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Early Decay Time, EDT _m	5%	1.45	0.92	1.25	0.67	0.79	1.65
Sound strength, G _m	1 dB	1.26	0.33	0.62	0.44	0.51	0.70
Definition, D _{50,m}	0,05	2.35	0.65	0.82	0.48	0.50	0.78
Central time, T _{S,m}	8,5 %	1.66	0.45	0.71	0.60	0.44	0.83
Clarity, C _{80,m}	1.5 dB	2.03	0.62	1.18	0.89	0.56	0.61
Early lateral energy fraction, J _{LF,m}	0.05	1.76	2.79	1.46	1.90	1.91	5.66

^dJND values according to [14] and [18]

Creating auralizations to compare the results obtained with measured and simulated IRs under the same conditions can confirm that the simulated acoustic field is able to recreate listening conditions inside the building or, conversely, show inaccuracies or differences to be corrected. At this point a fine tuning process is necessary to obtain more accuracy and improve the model.

Fine Tuning Process

The fine tuning process involves the analysis of the spatial information resulting from the use of 3D sound field measurements. The comparison between directional maps created from measured and simulated B-format IRs at each receiver point leads to crucial information about early reflections: whether reflections arrive at the same time and from the same direction in both cases, how simplifications in the model have effects on the reflexion pattern, the influence of the

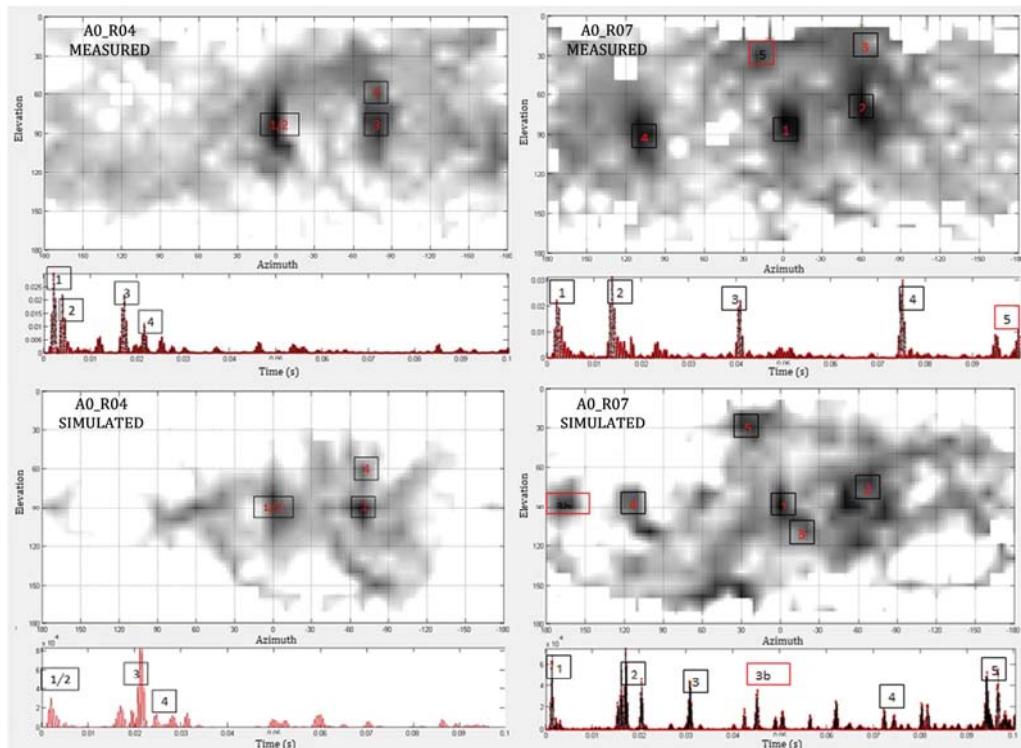


Figure 4. Measured (above) and simulated (below) directional maps filtered at 1 kHz for receivers 04 (left) and 07 (right) with source A.

scattering coefficients assigned to each surface.

As an example, Fig. 4 shows the directional maps obtained at 1 kHz for two different source-receiver combinations. It can be seen that measured and simulated reflection patterns are similar in both cases, considering that the main reflections come from the same direction and arrive at the same time (only the relative difference between a given reflection and the direct sound must be taken into account since the absolute time scale may show small differences due to direct sound detection algorithm). Measured responses clearly show much more scattered reflections distributed throughout the space.

For receiver 04, four stronger reflections can be distinguished. The direct sound and the first-order reflection coming from the pews arrive almost at the same time in the simulated pattern, because of the simplification of the pews in the model. Reflections 3 and 4 are in good agreement, considering that small variations can be tolerated. Receivers which are located further from the source, such as receiver 07, have richer reflection patterns, what might suggest a higher risk of inaccuracy. Conversely, most of the strongest reflections (reflections 2, 4 and 5) are simulated correctly, while a few others appear sometimes delayed and/or coming from other directions or simply do not appear (reflection 3 and 3b).

One of the most critical conditions comes out at receiver 09 (See Fig. 5), where the listening test shows a big difference: there is an audible echo in measured response which is less noticeable and arrives earlier and from a slightly different angle in the simulated response. By using the wide band signal, which provides peaks more clearly visible even if the direct sound of the simulated IR is louder than in the measured IR (possibly due to source directivity) and scattered reflections tend to mask earlier order reflections, it can be seen that for other reflections the agreement is pretty good. Focusing on reflection 05 (echo), the difference in the arrival time was initially explained as a consequence of reflections coming from one of the outer shells, while in the simulation it is coming from the inner shell. However, using image source method it appeared that higher order reflections (4th order) were coming from the curved surface at approximately the same time, but with small delays that, probably, prevented correct "addition" to create the echo. Likely the discretization of curved surfaces affected the distance travelled by the individual reflections, hence affecting the final results. However, in order to confirm this hypothesis model needs substantial changes and will require a deeper study.

CONCLUSIONS

The 3D model created in order to simulate the acoustic behaviour of the Jubilee Church "Dives Misericordiae" has been tested and calibrated following the usual approach used with existing buildings. Afterwards, a fine tuning process based on the spatial information resulting from the use of 3D sound field measurements was carried on.

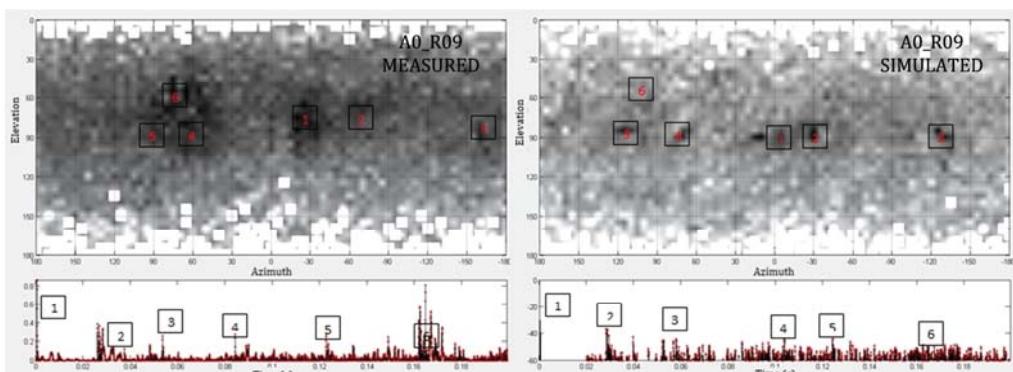


Figure 5. Measured (left) and simulated (right) wide band directional maps for receiver 09 with source A.



**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

Despite its limitations, the results obtained applying the usual procedure are good enough for some purposes, especially when working with simple buildings. Nevertheless, having this additional information about the arrival direction of the reflections allow us to go one step further and lead to a refinement of the model making simple modifications just where it is necessary. This refinement can be crucial especially when creating auralizations.

Even having this additional information sometimes is difficult to determine which modifications could improve the results and a deeper study about simulation techniques is necessary.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been partially financially supported by FEDER funds and the Spanish Ministry of Science and Innovation, as part as the project with reference BIA2010-20523, together with the Institute of Architecture and Building Science of the University of Seville.

REFERENCES

- [1] J.A. Garrido, T. Zamarreño, S. Girón, "Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain", *Applied Acoustics*, 73(9), (2012), p. 921-935.
- [2] J. Y. Jeon, J. H. Kim, C. K. Seo, "Acoustical remodeling of a large fan-type auditorium to enhance sound strength and spatial responsiveness for symphonic music", *Applied Acoustics*, 73(11), (2012), p. 1104-1111.
- [3] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome", *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (2009), p.1175-1186.
- [4] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches", *J. Acoust. Soc. Am.* 126 (2009), p. 1207-1218.
- [5] M. R. Schroeder, B. S. Atal, C. Bird. "Digital computers in room acoustics", *Proceedings of 4th International Congress on Acoustics ICA*, Copenhagen (1962), p. M21.
- [6] A. Krockstadt, S. Ström, S. Sörsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray-tracing technique", *J. Sound Vib.* 8 (1968), p. 118-125.
- [7] M. Vorländer: Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J. Acoust. Soc. Am.* 86 (1989) 172-178.
- [8] B. I. Dalenbäck. "Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection." *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 899-909 (1996).
- [9] B.-I.L. Dalenbäck. CATT-Acoustic v9 powered by TUCT use manuals. Computer Aided Theatre Technique; Gothenburg (Sweden), 2011.
- [10] G. I. Koutsouris, J. Brunsøg, C.-H. Jeong, F. Jacobsen, "Combination of acoustical radiosity and the image source method" *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (6), June 2013
- [11] M. Vorländer. "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties". *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 1203-1213 (2013).
- [12] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá, "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*, 2011, 97, 1, 155-170
- [13] F. Martellotta, "On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information", *Applied Acoustics* 74 (2013), p. 987–1000.
- [14] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [15] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi. "Guidelines for acoustical measurements in churches". *Appl. Acoust.* 70, (2008), p. 378-388.
- [16] E. Cirillo, F. Martellotta, "Worship, acoustics, and architecture", Multi-Science Publishing, Brentwood, 2006.
- [17] T. Okano, L.L. Beranek, T. Hidaka, "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls", *J. Acoust. Soc. Am.* 1998, 104, 255-265.
- [18] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". *J. Acoust. Soc. Am.* 128, 654-663 (2010).

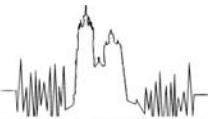
Appendix 4:
**Virtual acoustic reconstruction of the church of *Il Gesú* in Rome:
a comparison between different design options**
(Forum Acusticum 2014)

The research described in this appendix is motivated by the controversial dispute that arose concerning the architectural design of the church *Il Gesú*, the greater church of the Counter-Reformation designed by Vignola in Rome, and suitable acoustic conditions are therefore sought.

The process of dialogue and the compromise achieved between the Cardinal Farnese (who paid for the church), Vignola, and the Jesuits is well documented, and has even been previously studied from an acoustical point of view by other members of the research group (the following documentation can be consulted: J. Navarro, J.J. Sendra, S. Muñoz. (2009). *The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment*. Applied Acoustics, 70(6), 781-789).

One of the main points under discussion concerned the design of the ceiling: either a barrel vault or a flat wooden ceiling. Hence, taking advantage of the on-site measurement campaign carried out in the church and using a properly calibrated virtual acoustic model of the church (see *Chapter 5*), several design options of the ceiling have been acoustically assessed through acoustic simulations.

A4-2 | Acoustics of large worship places



Virtual acoustic reconstruction of the church of Gesú in Rome: a comparison between different design options

Francesco Martellotta

Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura, Politecnico di Bari, Bari, Italy.
 email: francesco.martellotta@poliba.it

Lidia Alvarez Morales

Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Seville, Spain. Email:calvarez6@us.es

Summary

The church of the Gesù in Rome was built as an example of how Counterreformation churches had to be according to the Jesuit order. Among the aspects taken into account, acoustics played a significant role, because preaching was one of the key points of the Jesuit order and, at the same time, the Council of Trent had emphasized the didactic role of the liturgical singing, based on clearly understandable words. During the building of the church a dispute arose as to which was the best way to cover the church in order to get suitable acoustic conditions. Cardinal Farnese (who paid for the church) preferred a barrel vault, while Jesuits seemed to prefer the flat coffered ceiling. In the end, the barrel vault was preferred to the flat coffered ceiling, but was it the right choice? Taking advantage of an on-site measurement campaign, a virtual acoustic model of the church was created and properly calibrated. Then, using the same surface characteristics a set of modified models with a flat coffered ceiling in place of the barrel vault was created. Different ceiling heights were considered, affecting both volume (and hence reverberation time) and delay of early reflections. A point-by-point comparison was finally carried out in order to analyze the effects that the different geometric configurations had on the acoustic parameters. Different sound sources, including human voice directivity patterns, were used in different positions in order to explore in detail the effects of the different covering options. Results suggest that it was ceiling height rather than its shape that could have made a difference on acoustic behaviour.

PACS no. 43.55.Ka, 43.55.Gx

1. Introduction

The church of the Most Holy Name of Jesus, better known to people visiting Rome as "*Il Gesù*" church, represents a rare example of worship building that was built having acoustics in mind. Or, better, is one of the few for which we have enough evidences that this happened. Some historical background is hence needed. The church was built as the main church of the Jesuit Order, founded by St. Ignatius of Loyola, in Rome. The first stone was laid in 1568 on a design by Jacopo Barozzi da Vignola. After his death, in 1573, della Porta (1533-1602) was appointed as architect of the church. He completed the interior of the building according to the original design, but redesigned

the facade. The church was consecrated in 1584 and became the reference model for several churches, especially those built by the Jesuits, all around the world [1]. As the Council of Trent was concluded just five years before the first stone was laid (1563), the church was conceived as the incarnation of the new principles. On the practical side one of the main aims targeted by the Counter-Reformation was to increase the participation of believers to the Mass. This was pursued by replacing the wall that separated the clergy from the laity by an iron fence, improving both the visual and the acoustic contact with the priest. Tombs and private monuments had to be removed from churches which, conversely, had to be more decorated and rich in splendid visual representations of the glorification of God. The architects were asked to look for new shapes capable of improving the visibility of the main altar (trying to remove the separation between naves),

using classical elongated plans (which both allowed processions and could not be criticized, as the central plan had been, as being derived from pagan temples), and providing enough space for side chapels (dedicated to different saints). All these suggestions outlined the principles on which the Gesù was built. The interior (Fig. 1) is organised on an elongated central plan, with a large nave (about 16 m wide), flanked by chapels and covered with a barrel vault, followed by a transect with short braces having the same width as the nave, and concluded by the chancel. A large dome was built on a cylindrical tambour at the intersection between nave and transect. The originally sober composition was largely altered during the Baroque era when heavy decorations and paintings were added to the surfaces of the church. Now, the barrel vault that covers the church is exactly the focus of our investigation and also was the argument on which an interesting debate arose at the time of its construction. In fact, as reported by Wittkover [1] and then further investigated in [2], the architect (Vignola), his client (Cardinal Alessandro Farnese), and the final users (the Jesuits, represented by father Tristan, right-hand man of Francis Borgia, who held the post of consiliarius aedificatorium in the Company of Jesus until his death), had different views on this topic. Father Tristan was a convinced supporter of the flat wooden ceiling (as proved by other epistular documents cited in [2]) and made many efforts to put pressure on the Cardinal to have the new church covered with a flat wooden ceiling, instead of a barrel vault, precisely for acoustic reasons. However, the Cardinal had different views. In fact, a letter from Cardinal Alexander Farnese to Il Vignola, dated August 1568, points out the differences in the cardinal's and the Jesuits' criteria for the construction. In this letter, the Cardinal, after ordering Vignola not to exceed the budgeted amount and demanding the church be well proportioned in accordance with the proper rules of architecture, informed him that the church should not have three-naves, but only a single one, with chapels at both sides and covered with a vault and not in any other way. However, he stated that the Jesuits believed this might hinder preaching as the voice would not be very intelligible due to the echo, which would be greater than if the ceiling were flat and wooden, something the cardinal did not find feasible, as he expressed the opinion that other vaulted churches with greater volume adapted well to the preacher's voice. He ended the letter saying that with the exception of these three main elements, that is to say, cost, proportions and covering the church with a vault, he would leave the rest to Vignola's own judgement. The less clear aspect of this dispute is about Vignola's point of view on the argument. In fact, he apparently gave shape to their ideas.

Taking advantage of a set of acoustic measurements carried out in the church [3], a virtual model was made

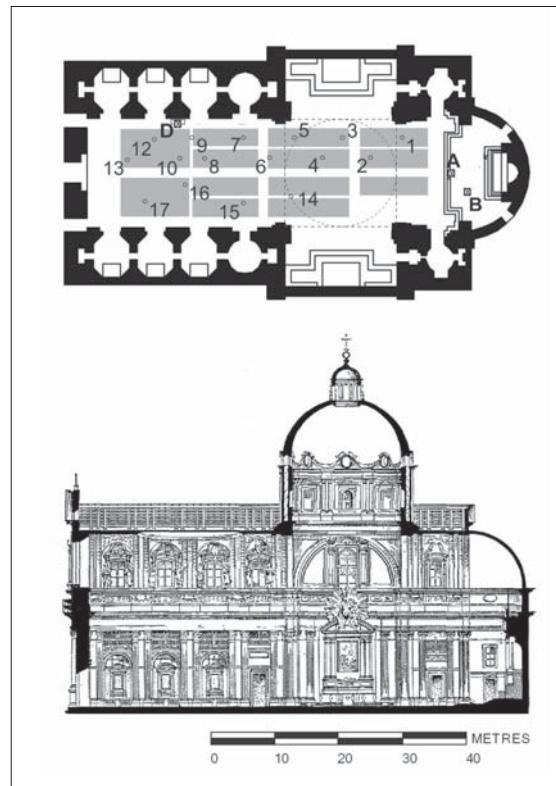


Figure 1. Plan and cross section of the church

using CATT-Acoustic software and, after proper calibration, an investigation on the effect of alternative ceiling design was performed.

2. Methods

2.1. Acoustic measures

The on-site acoustic measurements were carried out using an omni-directional dodecahedron sound source (Lookline D301), together with an additional subwoofer in order to improve the low-frequency response. The excitation signal was a 40 s equalized sine sweep with a suitable length to ensure a sufficient signal-to-noise ratio throughout the spectrum of interest. Monaural, binaural (B&K 4100D) and B-format (Soundfield MK-V) microphones were used to get the impulse responses (IRs) from which the main acoustic parameters were calculated. All the instruments and the procedures were complying with ISO standard 3382-1 [4] and with church-specific guidelines [5]. The sound source was located in two positions in front and at the side of the altar, whereas ten receiver points were distributed throughout the area normally covered by the pews and/or by the standing congregation (see Fig. 1). A summary of the room-averaged acoustic parameters is given in Table I

Table I. Summary of room-averaged acoustic parameters.

Parameter	Unit	Value
T30 _{500-1k}	[s]	5.22
EDT _{500-1k}	[s]	5.26
G _{500-1k}	[dB]	4.50
C80 _{500-2k}	[dB]	-8.80
C50 _{500-1k}	[dB]	-11.0
Ts _{500-1k}	[ms]	422
JLF _{125-1k}	[%]	19.7
1-IACC _{500-2k}	[·]	0.54

2.2. Acoustic model calibration

The computer simulation of the acoustic behaviour of the churches was carried out by using the software CATT Acoustic v.9.0.a [6], which is based on geometric acoustic algorithms. The simulations undertaken use TUCT v1.0h engine and, in particular, the basic algorithm for closed-rooms (short calculation, basic auralization) with a max split-up order equal to 0. The number of rays was set automatically, and the truncation time of the length of the impulse response was determined depending on the measured reverberation time in the church. A simplified 3D geometrical model of the church was created in order to perform the simulations, with decorative patterns simulated by proper modification of the absorption and scattering coefficients (so that the coefficients increased with the degree of decoration). The absorption coefficients were first assigned considering usual literature values, combining them with those resulting from documented simulations of similar buildings. Anyway, as each church is different from the others and specific features are often hidden or difficult to be grasped from simple visual inspection, an iterative adjustment process was carried out starting from the absorption coefficients of the most unusual or uncertain surfaces, possibly covering large areas so that small variations from the originally assigned values could lead to a better agreement between simulated and measured parameters. During this step, only reverberation times were considered and the iterative calibration process was concluded when simulated values differed from measured by no more than one just noticeable difference (JND), which, according to ISO 3382-1 [4], corresponds to 5% of the reference value. The assessment was carried out at each octave band and averaging the JND over all source-receiver combinations. After that, the agreement between measured and simulated values of the other acoustical parameters defined in the ISO 3382-1, at each receiver and also at each frequency octave band, was checked. Again JND error was considered, assuming as reference values those given in ISO standard 3382-1 [4], combined with those specifically determined for more reverberant rooms[7], or for specific parameters [8]. Results of this process showed considerable agreement over the whole spectrum (with the predictable exception of the lowest

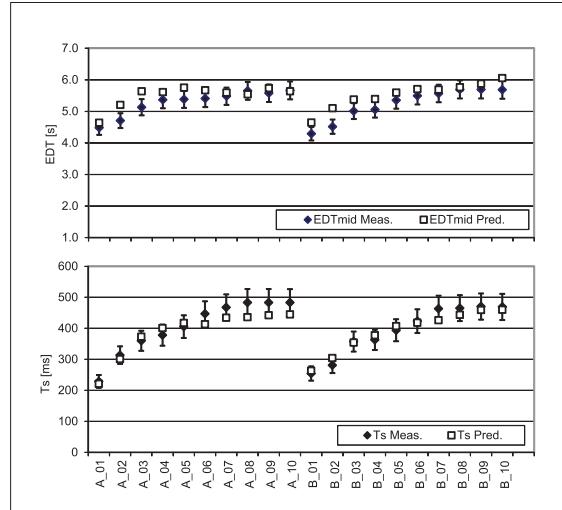


Figure 2. Comparison between measured and predicted values (averaged among 500 Hz and 1 kHz bands) as a function of source and receiver combination

frequencies), and in most of the source-receiver combinations (Fig. 2). Clarity (C80) was the only parameter to show bigger differences, particularly at receivers far from the source. This was likely a consequence of an increased attenuation of direct sound and early reflections that move at grazing angles.

2.3. Alternative church designs

Once the model was calibrated, the next step was that of defining properly the alternate models to compare. The epistular debate quoted in the introduction did not help us much from this point of view. In fact, we only know that a flat coffered ceiling was the alternative idea, but its height and the details of the nodes (with the crossing and the transepts) can only be guessed. Now, Renaissance architects frequently sought simple proportions between room dimensions. In addition, many churches of the same period covered with flat ceiling nonetheless had a dome over the crossing (e.g. the Church of Santo Spirito and San Lorenzo in Florence, both by Brunelleschi). So, two alternate designs were evaluated. The first one (model B) assumes that the coffered ceiling covers the whole church and has a height equal to the nave width (16 m). This design can be assumed as the most 'extreme' and favourable from the acoustical point of view, even though from the architectural point of view it is likely to be quite unlikely, due to the 'clumsy' proportions. The second design (model C) represents a more likely architectural compromise. In fact, the ceiling height is 24 m (1.5 times the nave width), thus allowing for arches to connect the naves with the crossing. In addition, a dome was located at the crossing, although not laying on a tambour as the original one (Fig. 3).

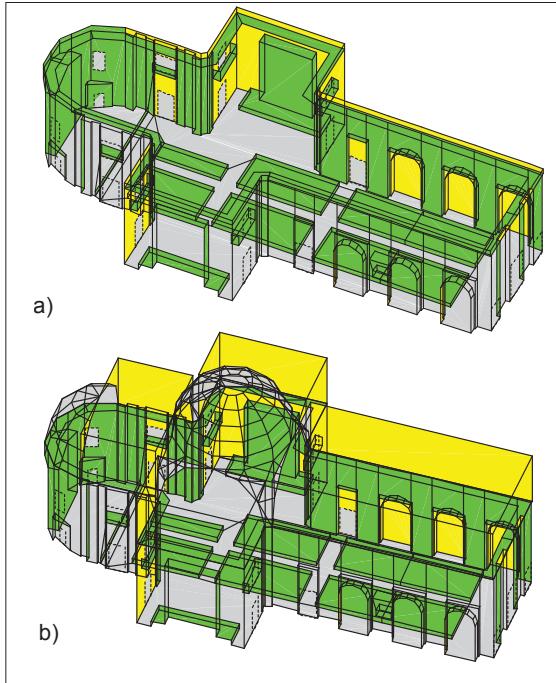


Figure 3. Alternate room design used for comparison. a) Model B, b) Model C.

Results from previous measurement campaigns showed that coffered ceilings may have absorption coefficients (more or less evenly distributed at all frequencies) up to 0.25 when they are made of plaster [9], and up to 0.6 when they are made of wood [3], depending on their depth and amount of decoration. As a consequence, for the purpose of the present paper an absorption coefficient of 0.5 at all frequencies from 125 Hz to 4 kHz was used. The use of such high values is not unusual in churches where decorations can significantly contribute to make hard surfaces much more absorptive (e.g. the original absorption coefficients for the vaults varied between 0.17 and 0.2 in the calibrated model). In addition to acoustical modifications due to increased sound absorption, a significant contribution will be due to volume reduction. In fact, the original church model had a volume of about 40000 m³, while model B was 21000 m³ and, finally, model C was 33000 m³. Effects of such changes will be discussed in detail below.

3. Results

As expected, the significant room variation, combined with the increased absorption coefficient of the ceiling, determined a noticeable change in reverberation times. Room averaged values are given in Fig.4, and show that Model B could reduce T30 to about 2.7 s at mid frequencies, while Model C to 3.9 s in unoccupied conditions. Given the even distribution of the

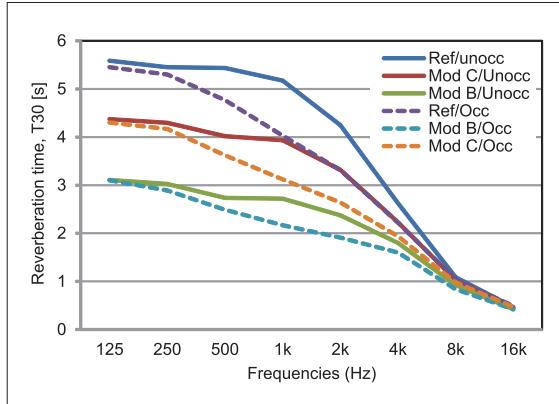


Figure 4. Comparison between different reverberation times as a function of frequency for different room designs

absorption of the ceiling, the shape of the reverberation curve as a function of frequency shows barely noticeable changes, with the bass ratio (BR) varying from 1.03 in the original configuration, to 1.13 for Model B and 1.09 for Model C.

The fully occupied conditions were also simulated assuming a standing congregation with a density of 1.2 pers/m²[10], showing that for current conditions mid-frequency T30 drops to 4.4 s, while for Model B it becomes 2.3 s, and finally for Model C it goes to 3.3 s. As the absorption coefficient of a congregation is low in the lowest bands, the BR increases to, respectively, 1.22, 1.28, and 1.25.

Such variations in reverberation time will consequently affect clarity-related parameters. However, as speech intelligibility was one of the key points of the original debate, a more detailed analysis was carried out by taking into account individual position results of Speech Transmission Index.

For unoccupied conditions, when the source was located at the altar, Figure 5 shows that Model B gave, as expected, the best results, with increased STI values and differences up to 0.1 particularly for the farthest receivers distributed along the nave. Model C showed an intermediate behaviour, with variations not exceeding 0.05 at the farthest receivers. The improvement shown by Model B resulted from reduced T30, but also from additional early reflections from the ceiling. In fact, reflections with delays ranging from 65 ms (for receivers closer to the source) to 35 ms (for the farthest receivers) were found in the simulated impulse responses. For Model C the lower variation was due to the longer reverberation as well as to the presence of the dome that removed useful reflections from the ceiling for most of the nave area (exactly as it happened with the current configuration). A small increase as a function of distance was observed above 40 m as a consequence of reflections from the back wall. Consequently, for Model C receivers close to the source showed minor STI changes

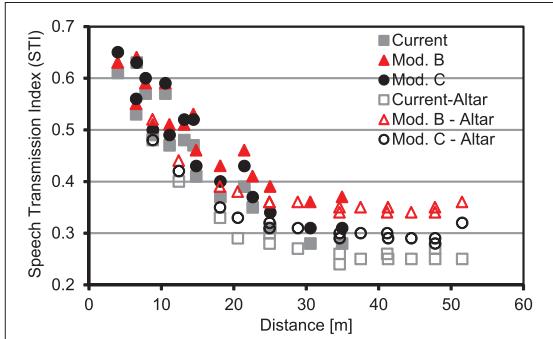
**FORUM ACUSTICUM 2014
7-12 September, Krakow**
Martellotta, Alvarez: Acoustics of the church of Gesù in Rome


Figure 5. Plot of STI values as a function of source-receiver distance for different source position and different room designs in unoccupied conditions. Full symbols correspond to source on the pulpit.

as the direct sound contribution was stronger and, at the same time, reflection from above arrived too late to be useful (after 100 ms). Then, when the distance grew and the delay could become short enough to let reflections contribute to clarity (with a total height of 24 m, this corresponds to a delay of about 70 ms at points under the crossing and to a delay of 55 ms at the end of the nave), the presence of the dome prevented reflections from arriving. Conversely, the lower ceiling height in Model B, combined with its uniform covering, resulted in a significant improvement of intelligibility conditions throughout the nave, and even though the absolute values still remained quite low, at least the qualitative descriptor at farthest points moved from "bad" to "poor".

When occupied conditions were taken into account (Figure 6) the reduced reverberation time shifted all the STI values upwards, with an average increase of 0.05 independent of the ceiling design. Taking into account absolute values, for both models B and C only the receivers within a 15 m distance from the source showed STI values above 0.45 (corresponding to the "fair" quality rating), while at longer distances the average value was 0.4 for Model B and 0.35 for Model C (but it was 0.30 for current conditions).

When the source was moved to the pulpit, a first interesting difference appeared, compared to the altar. In fact, the plot as a function of the distance appeared more scattered because receivers at similar distances but different positions (e.g. Rec. 13 and 16) showed significant differences, up to 0.1. Such difference depended on the contribution of early reflections that are much stronger for Rec. 16 than for Rec. 13, resulting mostly from contributions from the back wall and from the canopy. Similar considerations apply to other pairs (10-12 and 06-15).

When considering alternative designs, both Model B and Model C showed very similar results, at least at points within 15 m of the source where an average improvement of 0.03 in STI appeared, while at

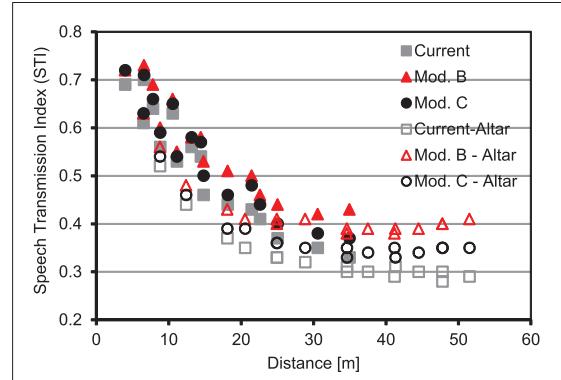


Figure 6. Plot of STI values as a function of source-receiver distance for different source position and different room designs in occupied conditions. Full symbols correspond to source on the pulpit.

larger distances Model B provided again better results. At farthest points (in this case closer to the altar) Model B performed better than Model C, with an average STI improvement respectively of 0.07 and 0.03 compared to current conditions. For receivers close to the pulpit, the improvement in intelligibility appeared mostly as the result of the reduced reverberation time. In fact, the reflections contributing to clarity arrived from the wall behind the source and the canopy, as well as from the entrance wall and, to a lesser extent, from the walls opposite to the source. The ceiling shape and its different height played only a marginal role here because the canopy intercepted most of the sound energy directed towards the ceiling making the time of arrival independent of the ceiling geometry, even though the area where such reflections were directed was somewhat limited. Conversely, receivers located inside and beyond the crossing showed a notable increase in STI values, up to 0.1 in Model B and up to 0.05 in Model C. Here the same considerations made when the source was located at the altar apply, therefore the continuous and low ceiling of Mod. B determines a dramatic performance improvement, with the absolute STI values dropping below 0.45 (the lower limit for the "fair" quality interval) only at distances beyond 25 m. Model C showed STI values lower by about 0.04 and a limiting distance of about 20 m.

Considering that at the time in which the church was built no seating existed and the congregation was free to move and gather around the center of the liturgical action, it is therefore likely that most of the audience was actually crowded around the pulpit during preaching. So, even if its effect is spatially circumscribed to a limited area, it was particularly interesting to understand (and quantify) the effect of the canopy on the acoustics of the church. So, simulations in occupied conditions were run again after removing the canopy.

Table II. STI variations resulting in different church models after removing pulpit canopy.

Distance	Model A	Model B	Model C
≤ 10 m	-0.02	-0.03	-0.02
10-20 m	-0.01	-0.01	-0.01
≥ 20 m	0.00	0.00	0.00

Results showed that additional reflections from the ceiling were now obtained for most of the receivers. However, delays varied from a maximum of 60 ms to about 40 ms, thus being useful for clarity, only for Model B. For Model C delays exceeded 100 ms at receivers close to the source, and reduced to about 70-80 ms as the distance grew, showing at least beneficial effects at points where direct sound became weaker. Finally, in the current model, even removing the canopy, no early reflection (up to third order) from the vault could be obtained. Thus, if removing the canopy certainly gave the shape of the ceiling a more relevant role on the acoustics of the church, it is worth investigating whether this effect was positive or negative. From the quantitative point of view, removing the canopy caused slightly detrimental effects on STI at all the receivers within 10 m of the source (Table II), while in the remaining points variations were largely negligible. Despite being the design with the best acoustic performance, Model B showed also the largest variation in STI values when the canopy was removed. This confirmed that this element, often designed with aesthetic rather than functional criteria in mind, played only a marginal acoustic role which was limited to receivers within a close reach of the source.

4. Conclusions

A set of alternative designs for the church of "Il Gesù" in Rome were analysed. The shape and height of the covering was changed, following the suggestions resulting from some Renaissance epistular documents related to the church. In particular a flat wooden ceiling was simulated, making an educated guess about its possible height (16 and 24 m) and its intersection with the crossing (with and without a dome). Results confirmed that when the nave height was limited to 16 m optimal acoustic conditions were obtained as a consequence of reduced reverberation time and shorter delay of reflections coming from above. The second solution with taller ceiling and dome in the crossing was better than the current solution, but not as good as the previous one. In particular the dome over the crossing proved to be detrimental to the acoustic conditions in the part of the church opposite to the sound source position. When the source was on the pulpit the best acoustic conditions for intelligibility were observed, mostly as a result of the many reflecting surfaces. The ceiling played a minor role in that case

because of its distance and consequent delay of the reflections. Finally, even though the variations were not as impressive as one could imagine, the flat ceiling proved to be more effective than the barrel vaults.

Acknowledgement

This work has been partially financially supported by FEDER funds and the Spanish Ministry of Science and Innovation, as part as the project with reference BIA2010-20523, together with the Institute of Architecture and Building Science of the University of Seville.

References

- [1] R. Wittkover: Architectural Principles in the Age of Humanism, Academy Editions, London.(1962)
- [2] J. Navarro, J.J. Sendra, S. Muñoz: The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. *Appl. Acoust.* **70** (2009) 781-789
- [3] E. Cirillo, F. Martellotta: Worship, acoustics, and architecture. Multi Science, Brentwood (UK), 2006.
- [4] ISO 3382-1:2009(E). Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009
- [5] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi: Guidelines for acoustical measurements in churches. *Appl. Acoust.* **70** (2008) 378-88.
- [6] B.I. Dalenbäck, CATT-Acoustic v9 powered by TUCT user manuals. Computer Aided Theatre Technique; Gothenburg (Sweden), 2011.
- [7] F. Martellotta: The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* **128** (2010) 654-63.
- [8] J.S. Bradley, R. Reich, S.G. Norcross: A just noticeable difference in C50 for speech, *Appl. Acoust.* **58** (1999) 99-108
- [9] F. Martellotta: Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.* **126**(3) (2008) 1175-1186.
- [10] F. Martellotta, M. D'Alba, S. della Crociata: Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences. *Applied Acoustics* **72**(6) (2011) 341-349.

Appendix 5:

Preliminary research published in several conferences

(TecniAcústica2012, TecniAcústica2013, and TecniAcústica2015)

In this appendix, several conference publications related to this doctoral thesis are featured, specifically, those relating to the preliminary research.

Such research work was expanded and/or improved thanks to the feedback received from other researchers who attended the conferences, all considered experts in the field of room acoustics, and many of whom are engaged in the study of the acoustics of heritage buildings.

The final findings derived from the complete research work are presented throughout this dissertation, and the majority of which are also published in a wide variety of high-impact journals for articles on acoustics.



ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES SISTEMAS PARA LA MEDIDA DE RESPUESTAS IMPULSIVAS

L. Álvarez-Morales, M. Galindo-del-Pozo, T. Zamarreño-García, S. Girón-Borrero.

Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Avda. Reina Mercedes 2, 41012
Sevilla, Spain. Tel.: +34 954556612. Fax: +34 954557892
{e-mails: calvarez6@us.es, mgalindo@us.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es}

Resumen

La respuesta al impulso (RI), registrada en un punto de recepción cuando la fuente sonora emite desde la ubicación del emisor en un recinto, contiene toda la información necesaria para describir el comportamiento acústico del mismo entre ambas posiciones. Para caracterizar el recinto en su conjunto, es usual utilizar varias posiciones de emisión y de recepción. Los ordenadores actuales, conjugando hardware y software adecuados, permiten registrar, procesar y analizar de forma eficiente estas RIs según los criterios de la normativa internacional aplicable en cada caso.

Se presenta aquí un estudio comparativo ciego de tres sistemas para medidas acústicas de salas. Las comparaciones se han establecido a partir de las respuestas al impulso medidas en el salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla con cada uno de los tres equipos usando un mismo tipo de señal de excitación. Para ello, se han calculado los principales parámetros de salas recogidos en la norma UNE-EN-ISO 3382-1. Para cada parámetro calculado se han estudiado las diferencias encontradas tanto del valor promediado espacialmente por bandas de octava, como del promedio espectral en cada punto de recepción. Para una valoración de dichas diferencias se ha tomado como referencia el umbral diferencial.

Palabras-clave: respuesta al impulso, señales de barrido, parámetros acústicos de salas.

Abstract

The room impulse response (RIR), recorded at a reception point when the sound source emits from the location of the emitter, contains all the information necessary to describe the acoustic behaviour within a room. In order to characterize the enclosure as a whole, several emission and reception positions are commonly used. Current computers, equipped with suitable hardware and software, enable these RIRs to be registered, processed and analysed in an efficient way in accordance with the criteria of the international standards applicable in each case.

This paper presents a blind comparative study of three systems for the measurement of room acoustics. Comparisons have been drawn up from the impulse responses measured in the auditorium of the School of Architecture of Seville with each of the three sets of equipment by means of the same type of excitation signal. To this end, the main parameters of room acoustics from standard ISO 3382-1 have been calculated. For each parameter calculated, the differences between both the spatially averaged value in octave bands and the spectral average at each reception point have been studied. In order to evaluate the differences found, the Just Noticeable Difference (JND), has been taken as a reference.

Keywords: impulse response, swept signals, room acoustic parameters.

PACS no. 43.58 Gn, 43.58 Ta

1 Introducción

El método de integración inversa de Schroeder [1] de la respuesta al impulso cuadrática, constituye la base de las técnicas de computación de acústica de salas. Con este procedimiento es posible calcular el tiempo de reverberación, los parámetros acústicos y otras características acústicas: funciones energía-tiempo (ETC), curva de decrecimiento de energía de Schroeder (EDC), índice de transmisión de la palabra (STI), etc...

Sin embargo la respuesta al impulso en una sala real no está libre de la influencia del ruido de fondo en todo el rango de frecuencias. Como consecuencia, las curvas de decrecimiento dependerán del límite superior de integración y del nivel de ruido. Se han propuesto diferentes métodos para corregir estos errores: en el *truncado iterativo* [2, 3], la respuesta al impulso es truncada en un determinado instante en que el ruido empieza a dominar, el cual es introducido en la curva de decaimiento de energía para estimar la relación señal-ruido; en el *método de sustracción* [4], se propone una técnica de compensación donde la contribución del ruido de fondo es sustraída de la curva de decrecimiento de energía. Otras técnicas más avanzadas han sido propuestas para aminorar los efectos del ruido de fondo, no sin cierta complejidad computacional y exigiendo tener datos a priori del decrecimiento de la señal, así Xiang [5] ha desarrollado una técnica de regresión no lineal para una estimación simultánea del nivel inicial, la pendiente y el ruido de fondo. También Morgan [6] ha cuantificado los efectos del ruido de fondo, del tiempo de truncado y del rango de evaluación en la precisión en la estimación del tiempo de reverberación, estableciendo unas guías prácticas para mejorar la estimación de la pendiente de ajuste en su determinación. Recientemente Huszty *et al.* [7] revisa el concepto de relación señal/ruido para respuestas impulsivas.

Además de la adecuada relación señal-ruido, que puede influenciar notablemente el correcto cálculo de los parámetros, existen otras fuentes de error en la cadena experimental que pueden confluir en los resultados, produciendo falta de objetividad y reproducibilidad en las medidas.

Mencionamos a continuación algunos trabajos que se han ocupado de algunos de estos aspectos; por ejemplo, los dos *Round Robins* internacionales organizados con objeto de realizar una comparación de los algoritmos de sistemas de medida usando una respuesta al impulso sintetizada [8], o una real [9]. Asimismo, las características de la direccionalidad de la fuente en la dispersión de los resultados de los parámetros acústicos, han sido estudiadas por Arana *et al.* [10] cuantificando estas diferencias en términos de JNDs. Otros estudios también han analizado las incertidumbres en las medidas de acústica de salas relacionadas con el uso de diferentes transductores y su colocación [11-12].

De la misma forma otras investigaciones más recientes realizan una comparación de los resultados de los parámetros acústicos obtenidos con diferentes herramientas de software y hardware y entre diferentes métodos de medida (ruido estacionario interrumpido, señal impulsiva, barridos sinusoidales) como el realizado por Fausti *et al.* [13], o han centrado su estudio en el análisis de los resultados obtenidos con diferentes señales [14], o han analizado si las cuatro combinaciones de diferencias obtenidas entre los valores calculados de los parámetros acústicos (correspondientes a dos softwares de simulación) y a los resultados experimentales (con dos equipos comerciales diferentes) están dentro de un razonable rango de aceptabilidad [15].

El grupo de investigación de Acústica Aplicada del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, ha incorporado a lo largo de varios años,

Acústica 2012, 1 a 3 de Outubro, Évora, Portugal

diferentes sistemas de medidas, con diferentes prestaciones, para la evaluación de las características acústicas de los recintos, a través del análisis de la respuesta al impulso de la sala.

Ante la aparición de algunos valores anómalos para ciertos parámetros en alguna situación real, se decide acometer un multiprocesado con los diferentes sistemas, aprovechando las posibilidades (al menos teóricas) de intercambio de formatos entre ellos. Este proceso hace aparecer nuevos problemas por lo que se planifica un proceso riguroso de intercomparación en el que se limitan los factores externos que podrían tener influencia (recinto, posiciones de medida, transductores,...). El objetivo del presente trabajo es realizar una comparativa ciega de tres de ellos, utilizando el mismo tipo de señal de excitación en todos ellos y utilizando una misma sala piloto. Para lograrlo se ha optado por analizar las posibles diferencias entre los parámetros de sala más relevantes calculados a partir de la respuesta al impulso, registrada en varios puntos del recinto piloto. Además, hemos incorporado otros dos sistemas de medidas, que actuarán como sistemas de control, con los que se ha hecho algún procesado adicional pero no se han utilizado en las medidas.

2 Recinto y método experimental

Para realizar el estudio comparativo se ha elegido como recinto piloto el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (ver Figura 1), por su fácil accesibilidad para realizar los ensayos y con el fin de eliminar la influencia de la sala en los procedimientos de medida y evaluación de resultados. Se trata esencialmente de una sala prismática de dimensiones aproximadas $18 \times 24 \times 8$ m, con un estrado sobrelevado unos 80 cm. La zona de audiencia está ligeramente inclinada y alberga con una ligera pendiente en la zona de audiencia ocupada por 364 butacas, medianamente tapizadas, las paredes laterales y de fondo están terminadas con paneles de corcho oscuro de aproximadamente 3 cm de espesor y la pared anterior está cubierta por un pantalla de proyección microperforada. El techo, tras la estructura ligera metálica que se observa en la Figura 1, está enlucido.

Las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento normalizado de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [16], pues aunque el objetivo no es caracterizar la acústica de la sala, la comparación de los sistemas de medida se basa en confrontar los valores de los diferentes parámetros acústicos contenidos en los anexos informativos de la citada norma.



Figura 1 – Vista interior del salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla. A la derecha se observan las marcas de los puntos de ubicación de los receptores.

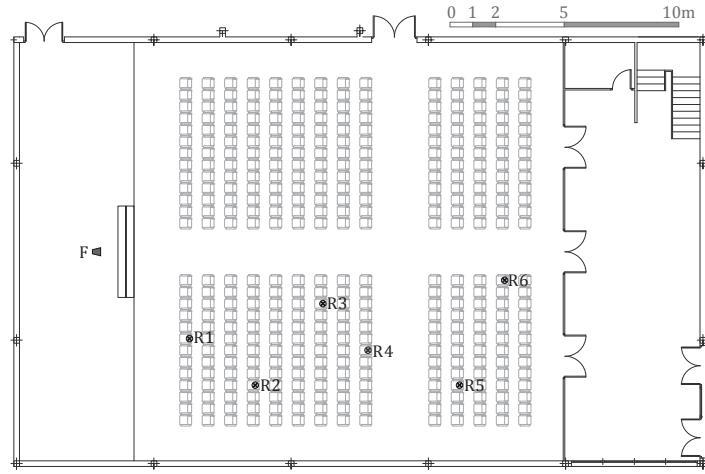


Figura 2 – Planta del recinto, en la que se muestran las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R1 a R6).

El recinto estaba desocupado. La fuente sonora (F en la Figura 2) se situó en una única posición, sobre el estrado, en el plano de simetría vertical longitudinal de la sala, a 1,5 m sobre el nivel del suelo. Se seleccionaron 6 puntos de recepción, ubicados en la zona de audiencia (ver Figuras 1 y 2), a 1,2 m sobre el nivel del suelo. Hay que indicar que para eliminar los posibles errores al reposicionar el micrófono, tanto en su ubicación como en su orientación, éste permaneció fijo en cada posición mientras, intercambiando las conexiones, se medía con los tres sistemas. Por supuesto tampoco se modificaron ni la posición ni la orientación de la fuente sonora. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo entre los 26,8 y 27,5 °C, y la humedad relativa varió entre el 46 y 47 %. El nivel del ruido de fondo no se registró, pero las condiciones no variaron en todo el proceso de medida. Además, la disposición del recinto dentro de la escuela, hace que la sala presente bajos niveles de ruido de fondo.

Como señales de excitación se utilizaron señales sinusoidales de barrido exponencial en frecuencia. El rango de barrido se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 8000 Hz. Así mismo se ajustó el tiempo de barrido y demás condiciones recomendadas por los desarrolladores

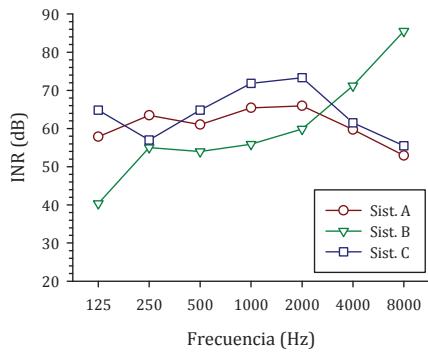


Figura 3 – Valores espectrales de la INR promediados espacialmente.

Acústica 2012, 1 a 3 de Outubro, Évora, Portugal

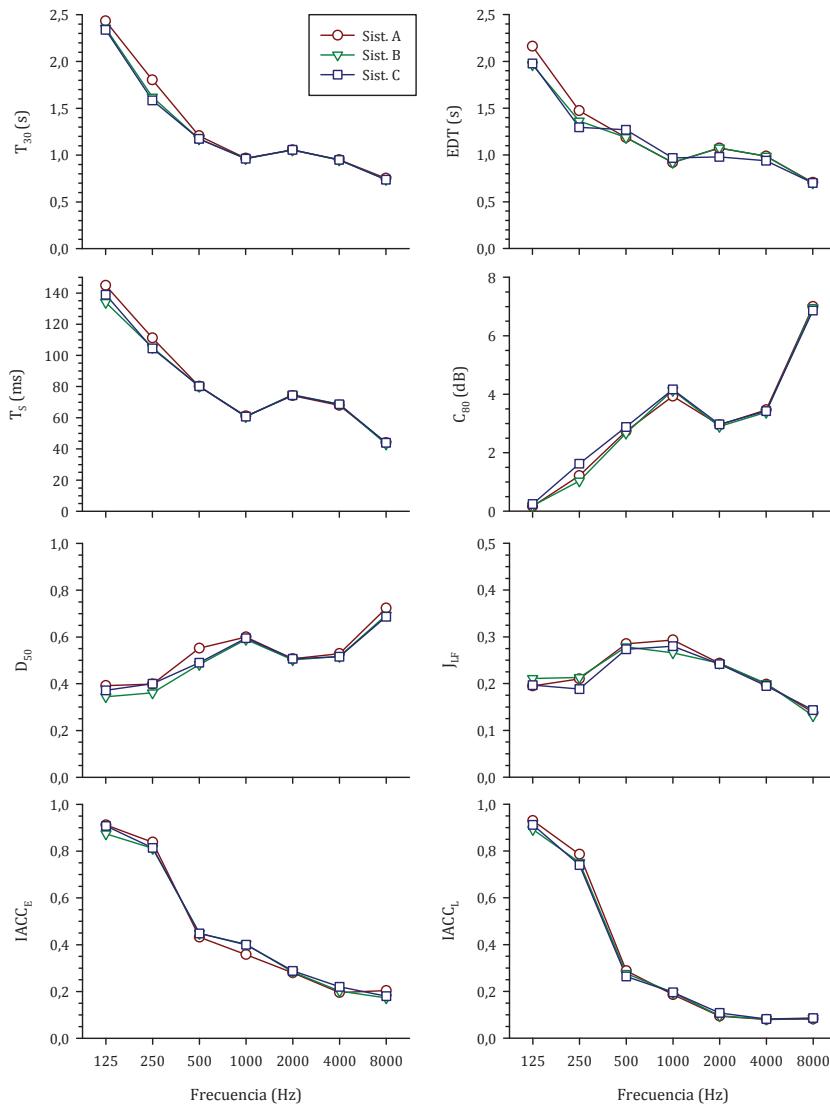


Figura 4 – Valores espectrales de los parámetros acústicos, promediados espacialmente, medidas y procesados con cada uno de los sistemas de medida.

respectivos. Se consiguieron relaciones señal-ruido impulsiva (INR) superiores a 45 dB para todas las bandas de octava de interés (ver Figura 3). Conviene observar, que para la obtención de INR apropiadas, los sistemas de medida analizados exigen al usuario una adecuada elección del tiempo de medida y del tratamiento del ruido de fondo, que si no son bien gestionados pueden dar lugar a notables diferencias entre los sistemas de medida incluso cuando el requisito de superar los 45 dB haya sido alcanzado en todas las bandas de octava. En general el sistema B es el que proporciona menores valores de INR.

El hardware común, constituyente de la cadena de medida, está constituido por el dispositivo USB de audio EDIROL UA-101 de Roland, que soporta varios canales de entrada y salida y es controlado por

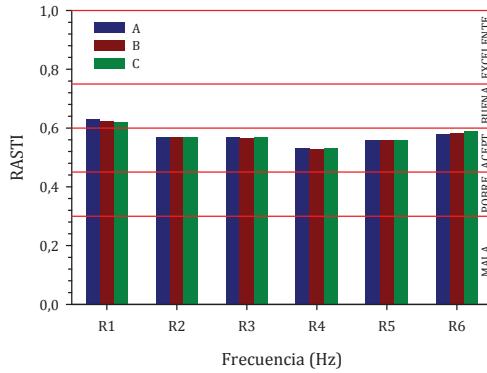


Figura 5 – Valores del índice RASTI obtenidos a partir de las RI con cada sistema y para cada receptor.

el software de cada uno de los sistemas ensayados. La señal generada por cada uno de éstos, a través del citado dispositivo, alimenta al amplificador de potencia B&K-2734 y se emite al recinto a través de la fuente omnidireccional dodecaédrica AVM DO-12. Las respuestas al impulso son capturadas mediante el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, que permite elegir manualmente entre un patrón omnidireccional o de figura de ocho. Cuando se calculan parámetros relacionados con la impresión espacial que así lo requieren, se utilizó el simulador de torso tipo HMU III de Head Acoustic.

3 Comparativa de los sistemas de medida

El proceso planificado se ha estructurado en dos análisis diferentes. En primer lugar, las RI medidas con cada uno de los sistemas se han almacenado en el formato propio de cada uno de ellos y se han procesado para obtener los valores espectrales, en bandas de octava, de los parámetros acústicos y de las diferencias observadas entre los diferentes sistemas. Además se evaluarán los valores únicos, promediados espectralmente, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO correspondiente, y normalmente utilizados como criterio de valoración acústica; así mismo se valoran las diferencias asociadas en términos de los valores umbrales de percepción (JND).

En segundo lugar las señales registradas se convertirán al formato universalmente aceptado para archivos de audio “wav”, común a todos ellos, con objeto de volver a procesar las señales registradas con cada sistema con los dos restantes, tras importarlas desde dicho formato y poder comparar así la intercambiabilidad de los diferentes algoritmos de computación. En algunas situaciones concretas se han procesado con otros dos sistemas que se han utilizado como sistemas de control en el procesado pero que no se utilizaron en el procedimiento de medida.

3.1 Parámetros de sala obtenidos con cada sistema de medida

Con el fin de cuantificar el orden de magnitud de los parámetros acústicos de la sala, en la Figura 4 se muestran los valores espectrales, promediados espacialmente, para cada uno de los sistemas de medida, que hemos denominado A, B y C, para cada uno de los parámetros analizados: el tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de reverberación inicial (EDT), el tiempo central (T_S), la claridad (C_{80}), la definición (D_{50}), la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y los coeficientes de correlación cruzada

Acústica 2012, 1 a 3 de Outubro, Évora, Portugal

interaural precoz ($IACC_E$) y tardío ($IACC_L$) [16]. Aunque los promedios espaciales obtenidos con cada uno de los sistemas son muy similares para todos los parámetros, se pueden apreciar ciertas diferencias, especialmente a bajas frecuencias, que se analizan con más detalle a continuación.

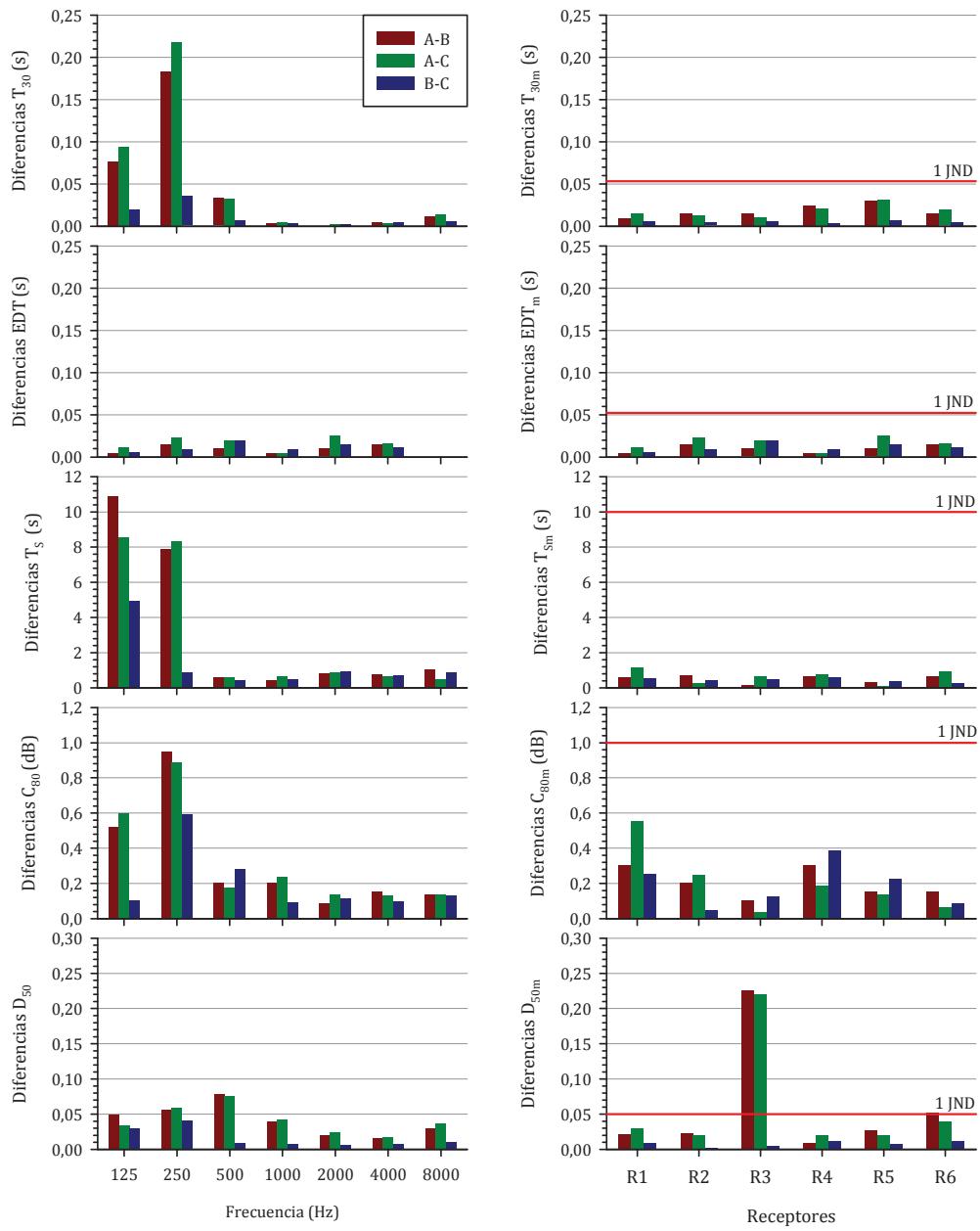


Figura 6 - Diferencias entre sistemas de medida (A; B y C) para T_{30} , EDT, T_s , C_{80} y D_{50} . A la izquierda los valores espectrales, promediados espacialmente, y, a la derecha, los valores espectralmente promediados para cada receptor.

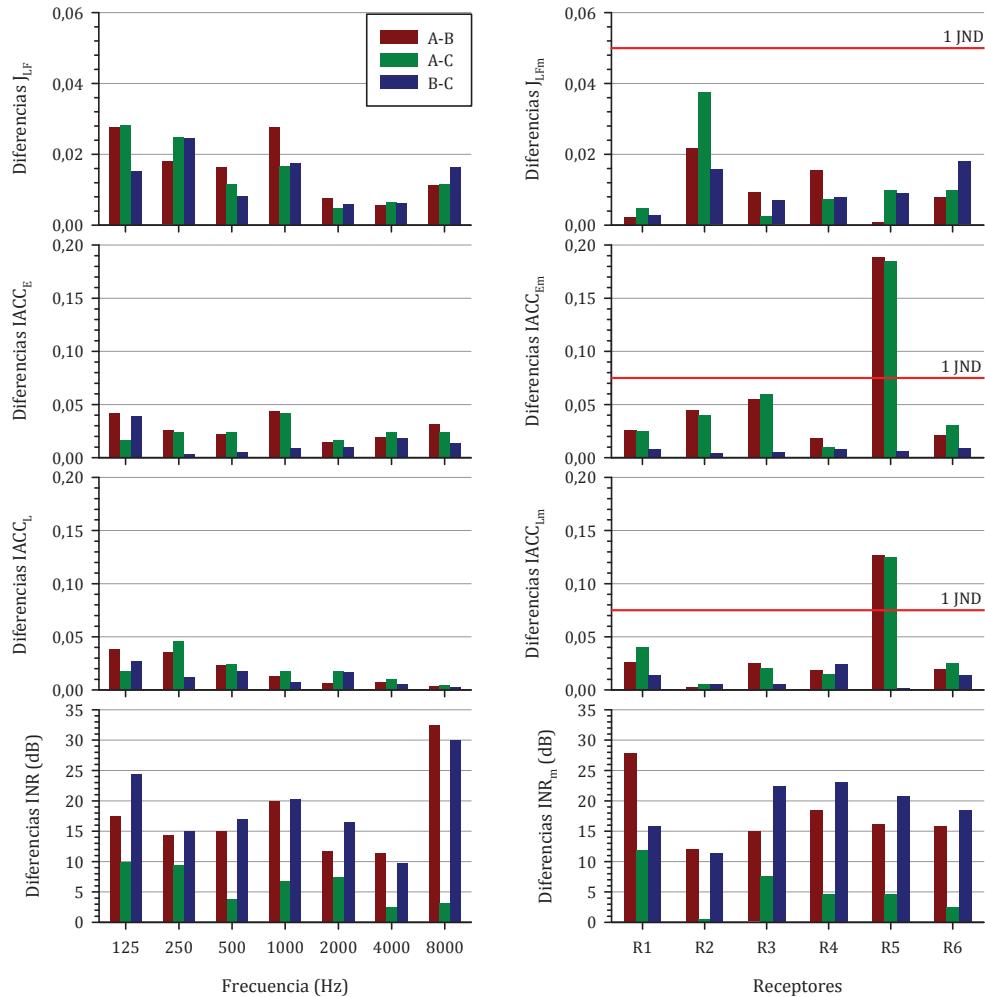


Figura 6 (cont.) – Diferencias entre sistemas de medida (A; B y C) para J_{LF} , $IACC_E$, $IACC_L$ e INR .
A la izquierda los valores espectrales, promediados espacialmente, y, a la derecha, los valores
espectralmente promediados para cada receptor.

En la Figura 5 se muestran los valores del índice RASTI (*rapid speech transmission index*) obtenidos a partir de las RI registradas, por tanto no se considera el efecto del ruido de fondo aunque se considera despreciable. En este caso los valores son prácticamente idénticos por lo que no se hace un análisis específico de las diferencias.

En la columna de la izquierda de la Figura 6 se presenta un estudio de los valores absolutos de las diferencias espectrales obtenidas para cada parámetro, con cada sistema de medida, cuando se promedian espacialmente. Además se presentan los valores absolutos de las diferencias para las INR obtenidas.

Cuando analizamos las diferencias de los valores promediados espacialmente frente a la frecuencia podemos observar que éstas son menores cuando se comparan los sistemas B y C. Ambos sistemas tratan de forma similar el cálculo de la INR, aun cuando el valor numérico de la misma difiere en uno y otro sistema. Además, los parámetros relacionados con la reverberación y la claridad del sonido percibida (que analizan la relación entre energía precoz y tardía), presentan mayores diferencias en las bajas frecuencias. En cualquier caso todos los sistemas presentan diferencias muy pequeñas, por lo que permitirían evaluar acústicamente la sala de igual forma como ya habíamos indicado.

Puesto que para valorar cada posición del receptor la ISO [16] establece un promedio espectral para cada uno de los parámetros y asocia un valor de discriminación a cada uno de ellos, el JND (*just noticeable difference*), se ha realizado un análisis de las diferencias de estos índices promediados espectralmente para cada uno de los receptores, en términos de los respectivos JND. El valor absoluto de las diferencias para cada parámetro de sala no supera dicho valor, a excepción de la definición (receptor 3) y los parámetros relacionados con la impresión espacial (receptor 5). Esta diferencia es atribuible a la medida realizada con el sistema A y estimamos que está relacionada con la detección de la llegada del sonido directo, pues la diferencia encontrada es significativa con respecto a los otros dos sistemas en todas las bandas de octava cuando examinamos ambos receptores. Por motivos de espacio

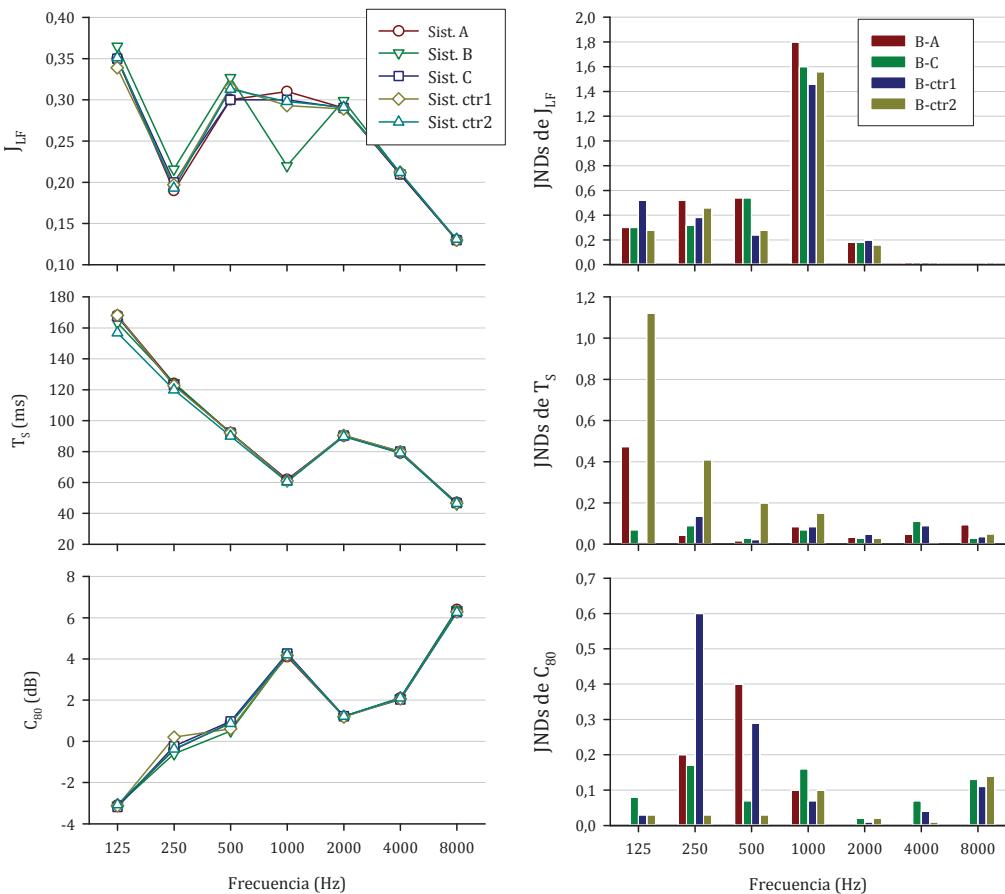


Figura 7 – Comparación de parámetros calculados a partir de las RI medidas en el punto R4.
A la izquierda los valores espectrales, y, a la derecha, las diferencias, en términos de los respectivos JND por bandas de octava.

este análisis pormenorizado no ha sido incluido aquí.

3.2 Análisis cruzado utilizando formato común de intercambio de archivos

Puesto que todos los sistemas permiten exportar al formato universal de audio “wav”, además de otros formatos ampliamente aceptados en este ámbito, se planteó un análisis cruzado entre ellos en el que la señal registrada con cada uno es exportada a dicho formato (con resolución de 16 y 32 bits) y procesada con los otros dos. Los resultados obtenidos para todas las combinaciones posibles, de la mayoría de los parámetros acústicos, para ambas resoluciones, son muy similares a los obtenidos con cada uno de ellos de forma independiente, presentando en todo caso diferencias muy inferiores al valor de 1JND.

El parámetro J_{LF} ha dado lugar a un análisis más riguroso, debido a las grandes diferencias encontradas inicialmente entre los valores calculados a partir de la señal exportada con 32 bits (valores similares a los obtenidos con cada software de forma independiente) y los calculados a partir de la señal exportada con 16 bits, con la que se obtenían valores mayores que la unidad (fuera del rango de valores del parámetro). Estos valores erróneos se deben al factor de normalización que aplican los sistemas con el objetivo de exportar la señal en formato wav de 16 bits con la máxima resolución posible. Dicho factor de normalización se calcula de forma independiente para la RI omnidireccional y la RI figura de ocho, perdiendo la relación de escala entre ambas; cuando este factor de normalización no puede ser leído por el software que importa la señal y la analiza, el cálculo del J_{LF} se ve afectado. Al exportar la señal en formato wav sin normalizar, los resultados obtenidos con los tres sistemas y los dos sistemas de control adicionales empleados arrojan resultados muy similares, permitiendo el intercambio de archivos entre todos ellos de forma fiable.

La Figura 7 muestra los resultados para el receptor R4, que es en el que aparecen las diferencias más notables, y aun así, los resultados obtenidos con todos los sistemas son muy similares. Es excepcional el comportamiento del valor de J_{LF} en la banda de 1 kHz con el sistema B y que no tiene justificación aparente a pesar de los esfuerzos realizados en este sentido.

4 Conclusiones

Se ha realizado un riguroso ensayo comparativo entre diferentes sistemas de medida; en primer lugar se han comparado los valores espectrales y los promedios en frecuencia recomendados obtenidos a partir de las señales registradas y procesadas por cada uno de los sistemas y, en segundo lugar, utilizando formatos comunes de intercambio de archivos se han comparado los resultados de procesamiento cruzado. Todos ellos proporcionan resultados muy similares. Todos los sistemas proporcionan resultados análogos midiendo y analizando de forma independiente, apareciendo las mayores diferencias a bajas frecuencias. Es posible intercambiar archivos entre los diferentes sistemas siempre que en el proceso de exportación no se utilicen procesos de normalización o escalado de la señal, pues no todos son capaces de leer esa información. Hemos de indicar que en este proceso no se ha utilizado el parámetro fuerza sonora, G, que requiere un proceso de calibración específico para toda la cadena de medida y es más difícil el transporte de dicha calibración entre ellos. Finalmente aparecen algunas dificultades específicas asociadas a cada uno de ellos que conviene considerar: así el sistema A en algunas situaciones presenta problemas al detectar automáticamente la llegada del sonido directo; el sistema B, en función de la configuración de medida, no compensa correctamente la afección del ruido de fondo en la respuesta al impulso, lo que puede producir errores en los parámetros que miden la reverberación; el sistema C es menos flexible a la hora de procesar señales registradas con otros sistemas y sólo admite dos canales de medida.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] Schroeder, M.R. New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 1965, 409-412.
- [2] Kürer, R.; Kurze, U. Integrationsverfahren zur nachhallauswertung, (Integration procedure for evaluating reverberation). *Acustica* 19, 1968, 313-322.
- [3] Lundeby, A.; Vigran, T.E.; Bietz, H.; Vorländer, M. Uncertainties of measurements in room acoustics. *Acustica* 81, 1995, 344-355.
- [4] Chu, W.T. Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 1978, 1444-1450.
- [5] Xiang, N. Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 1995, 2112-2121.
- [6] Morgan, D.R. A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation. *J. Acoust. Soc. Am.* 101(5), 1997, 2686-2693.
- [7] Huszty, C.; Sakamoto, S. A note on the definition of signal-to-noise ratio of room impulse responses. *Acoust. Sci. & Tech.* 33(2), 2012, 117-120.
- [8] Bradley, J.S. *An International Comparison of Room Acoustics Measurement Systems*. Internal Report, IRC-IR-714 National Research Council, Canada 1996.
- [9] Katz, B.F.G. International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Acoustic Research Letters Online*, 23 August 2004.
- [10] San Martín, R.; Witew, I.B.; Arana, M.; Vorländer, M. Influence of the source orientation on the measurement of acoustic parameters. *Acta Acustica-Acoustica*, 93, 2007, 387-397.
- [11] Perlerson, X., Vian, J.-P. On the variability of room acoustical parameters: reproducibility and statistical validity. *Appl. Acoust.* 37, 1992, 175-198.
- [12] De Vries, D.; Hulsebos, E.M.; Baan, J. Spatial fluctuations in measures for spaciousness. *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 2001, 947-954.
- [13] Fausti, P.; Farina, A. Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *J. Sound Vib.* 232(1), 2000, 213-229.
- [14] Policardi, F. MLS and Sine-Sweep technique comparison in room-acoustic measurements. *Elektrotehniški Vestnik* 78(3), 2011 91-95.
- [15] Segura, J.; Giménez, A.; Romero, J.; Cerdá, S. A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain. *Acta Acustica-Acoustica* 97, 2011, 155-170.
- [16] UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

**EVALUACIÓN PARAMÉTRICA Y SENSORIAL EN LA ENSEÑANZA DE
ACÚSTICA DE SALAS**

PACS: 43.55.Gx

Basturk, Seckin^{1,2}; Perea Pérez, Francisca^{1,2}; Álvarez-Morales, L.²; Zamarreño, T.²

¹Soundimensions, SC. Calle Páez de Rivera, nº 6- 1ºD. 41012 Sevilla, España.

E-Mail: basturk@soundimensions.eu; fpereaperez@soundimensions.eu

²Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC

Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel.: + 34 954556612. Fax: +34 954557892.

E-Mail: calvarez6@us.es, teofilo@us.es

ABSTRACT

This paper presents an initial version of an interactive tool which is intended to be used in room acoustics education. The interactive tool enables a virtual workspace in which users can apply different acoustic conditioning solutions to a room and obtain both, its parametric evaluation in terms of the most significant acoustic parameters, and its sensory (visual and auditory) evaluation through virtual reality immersion. Parameters and auralizations associated to each conditioning solution can be obtained from the measured and/or simulated impulse responses.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una versión inicial de una herramienta interactiva que se pretende utilizar en la enseñanza de Acústica de Salas. Con esta herramienta, el usuario puede aplicar diferentes posibilidades de acondicionamiento de una sala y obtener su evaluación paramétrica en términos de los parámetros acústicos más significativos, y su evaluación sensorial (visual y acústica), en la que el alumno tiene la posibilidad de inmersión en un espacio de realidad virtual. Tanto los parámetros como las auralizaciones asociados a cada solución de acondicionamiento podrán obtenerse a partir de las respuestas al impulso medidas y/o simuladas.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente los sistemas de enseñanza de acústica de salas se han basado exclusivamente en parámetros e indicadores numéricos obtenidos a partir del comportamiento acústico de la sala objeto de estudio, caracterizado por la respuesta al impulso (RI). Es posible correlacionar estos parámetros físicos con diversos atributos de percepción sonora como son el nivel sonoro subjetivo, la reverberación percibida, claridad, etc., tal y como se recoge en la norma UNE-EN-ISO [1].

Sin embargo, cuando se trata de magnitudes físicas como el sonido, entran en juego otros parámetros sensoriales (visuales, de confort...) que influyen de forma directa en la percepción del mismo, por ello resulta especialmente importante experimentar "in situ" dichos fenómenos ya que permite, concretamente en el ámbito de la enseñanza, que la comunidad estudiantil pueda asimilar y adquirir estos conocimientos.

Precisamente, la experimentación como técnica pedagógica posibilita establecer una relación reflexionada entre los parámetros numéricos y la percepción psicológica real del fenómeno físico. Asimismo la experimentación facilita la reconceptualización y permite insertarse en el proceso de producción de conocimientos y de investigación [2]. En las últimas décadas la tecnología ha permitido realizar grandes avances en las técnicas pedagógicas de experimentación y su aplicación en la enseñanza científica ha supuesto una mejora reconocida por numerosos estudios [3]. Concretamente en la actualidad están siendo empleadas las técnicas de realidad virtual como instrumentos pedagógicos capaces de transmitir conocimientos a través de la experimentación en campos como la ingeniería mecánica, la construcción, la arquitectura y la física entre otros [4-6].

Por ello, en el presente artículo se expone cómo aplicando las técnicas de realidad virtual en la enseñanza y el aprendizaje de Acústica de Salas, se puede obtener una herramienta interactiva que facilite al alumno una experiencia de inmersión en el ambiente objeto de estudio y le permita evaluar de forma sensorial y paramétrica los fenómenos físicos objetos de estudio.

METODOLOGÍA

Existen tres aspectos fundamentales que han motivado e intervenido en el proceso de desarrollo de la herramienta interactiva que aquí se presenta. El primero de ellos, ha sido procurar una integración entre los conceptos acústicos que se pretenden exponer, los aspectos arquitectónicos y la influencia ineludible de la percepción humana, todo ello en el contexto de la enseñanza de Acústica de Salas para alumnos de Arquitectura. El segundo aspecto, al que ya se ha hecho mención, es el uso de la experiencia como método clave para facilitar el proceso de aprendizaje de forma intuitiva y con una presentación atractiva. Por último, la accesibilidad ha sido considerada como un aspecto decisivo para el diseño de una herramienta que debe ser fácilmente distribuible.

Considerando estos aspectos, se ha optado por el uso de la tecnología de realidad virtual (VR) por la capacidad que ofrece de crear sofisticados entornos interactivos diseñados para el usuario final y recrear ambientes con alto grado derealismo. Esta tecnología se está posicionando actualmente en el campo de la acústica gracias a los avances conseguidos en los métodos de auralización empleados en estudios de acústica de salas [7, 8]. Incluso resulta destacable su empleo en numerosos estudios de percepción del ruido desarrollados en las últimas décadas [9, 10].

Por otra parte, cabe indicar que la herramienta desarrollada posee la capacidad de ser aplicada a cualquier entorno, bien se trate de un espacio real o imaginario. Sin embargo, el diseño por el que se ha optado, en esta primera aplicación, responde a la posibilidad de accesibilidad de los alumnos al recinto en cuestión para ofrecer asimismo cierto grado derealismo. Por ello, se ha escogido una sala real, el auditorio de la E.T.S. de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, que ha sido reproducida con suficiente exactitud para conseguir una recreación realista del entorno que permite al alumno, si cabe, la posibilidad de comparar la experiencia simulada con experimentos reales que pudieran llevarse a cabo.

En la Figura 1 se muestra un esquema-resumen de las fases de desarrollo de la herramienta y la descripción de cada una de ellas.

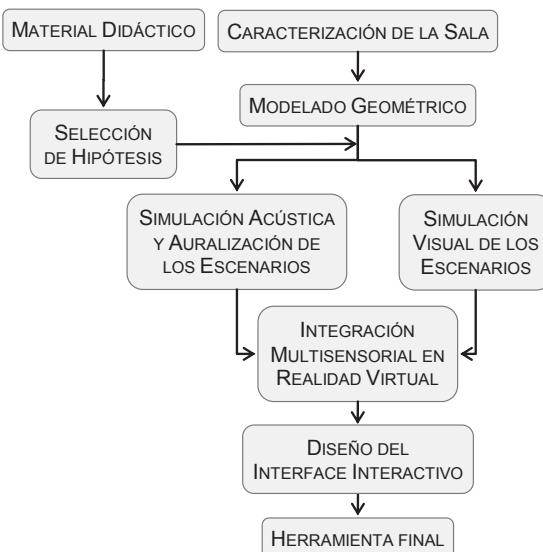


Figura 1. Esquema de la metodología empleada en el desarrollo de la herramienta.

Elaboración de las Hipótesis para el Material Didáctico

Uno de los principales puntos de partida para el diseño de la herramienta es definir qué conceptos o fenómenos físicos de la acústica de recintos se pretenden mostrar en la sala seleccionada. Atendiendo a los contenidos a impartir en la asignatura de "Acústica Aplicada a la Arquitectura y el Urbanismo" del nuevo plan de estudios de la E.T.S. de Arquitectura, se han seleccionado principalmente los conceptos de reverberación, absorción sonora, acondicionamiento acústico de salas y materiales, software de simulación acústica, auralización y audición binaural. Para explicar estos conceptos se han planteado una serie de hipótesis que, modificando las características actuales de la sala, ofrecerán al alumno la posibilidad de experimentar los distintos conceptos mencionados desde el punto de vista sensorial y paramétrico.

Se parte, por tanto, del modelo actual de la sala (Inicial), a partir del cual se valora la presencia de la audiencia, considerando una ocupación del 100% de las butacas (Ocupado). A continuación se ha eliminado en el modelo el revestimiento actual de las paredes ofreciendo la posibilidad de evaluar la sala sin ningún tipo de tratamiento (Hip.1). Asimismo, con la idea de poder valorar otras intervenciones, se considera la posibilidad de colocar un techo acústico (Hip. 2) e incluir además material absorbente en los paramentos laterales (Hip.3 y 4). En la Tabla 1 se resumen las diferentes hipótesis consideradas y su correspondencia con los conceptos que se pretenden evidenciar.

**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

Tabla 1. Hipótesis contempladas actualmente en el sistema de evaluación paramétrico-sensorial.

	Descripción	Conceptos acústicos	Tratamiento
Inicial	Estado actual	Simulación acústica, auralización	(*)
Ocupado	Estado actual ocupado al 100%	Absorción sonora de la audiencia	(*)
Hip. 1	Eliminación tratamiento acústico actual	Sala viva (poco absorbente), materiales reflectantes	Enlucido mortero en paramentos laterales
Hip. 2	Incorporación techo acústico	Sala intermedia, materiales absorbentes	Enlucido mortero en paramentos laterales, techo acústico KNAUF CLEANEO
Hip. 3	Incorporación material absorbente paramentos laterales	Sala absorbente, eco flotante, materiales absorbentes	Panel perforado TOPAKUSTIC (parte superior), techo acústico KNAUF CLEANEO
Hip. 4	Incorporación material absorbente paramentos laterales	Sala muy absorbente, materiales absorbentes, audición binaural	Panel perforado TOPAKUSTIC (parte inferior), techo acústico KNAUF CLEANEO

* No está sujeta a modificaciones

Descripción y Caracterización Acústica del Recinto

Tal y como se ha comentado anteriormente, el recinto seleccionado para la primera implementación de la herramienta ha sido el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (Figura 2), atendiendo a su accesibilidad para realizar ensayos acústicos in situ y por su geometría que facilita la representación de los modelos.

Se trata esencialmente de una sala prismática cuyas dimensiones aproximadas son 18x24x8m, posee un estrado sobre elevado de 57 cm. La zona de audiencia está ligeramente inclinada y alberga 364 butacas, medianamente tapizadas. Las paredes laterales y del fondo están terminadas con paneles de corcho oscuro de aproximadamente 3 cm de espesor y la pared anterior está cubierta por un pantalla de proyección microperforada y una cortina gruesa de terciopelo. El techo, tras la estructura ligera metálica que se observa en la Figura 2, está enlucido.



Figura 2. Vista interior del salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla. A la derecha se observan las marcas de los puntos de ubicación de los receptores.

En estudios anteriores, se realizaron diversas mediciones con el fin de obtener los parámetros acústicos que caracterizan al recinto seleccionado [11]. Cabe destacar que las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento normalizado de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [1]. El recinto estaba desocupado. La fuente sonora (F en la Figura 3) se situó en una única posición, sobre el estrado, en el plano de simetría vertical longitudinal de la sala, a 1,5 m sobre el nivel del suelo. Se seleccionaron 6 puntos de recepción, ubicados en la zona de audiencia (ver Figuras 2 y 3), a 1,2 m sobre el nivel del suelo. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo entre 26,8 y 27,5 °C, y la humedad relativa varió entre 46 y 47 %. El nivel del ruido de fondo no se registró, pero las condiciones no variaron en todo el proceso de medida. Además, la disposición del recinto dentro de la escuela, hace que la sala presente bajos niveles de ruido de fondo.

Como señales de excitación se utilizaron señales sinusoidales de barrido exponencial en frecuencia. El rango de barrido se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 8000 Hz. Se consiguieron relaciones señal-ruido impulsiva (INR) superiores a 45 dB para todas las bandas de octava de interés. Los valores del índice STI medido se ha obtenido a partir de las respuestas al impulso sin contabilizar el efecto del ruido de fondo ya que éste era despreciable como ya se ha citado.

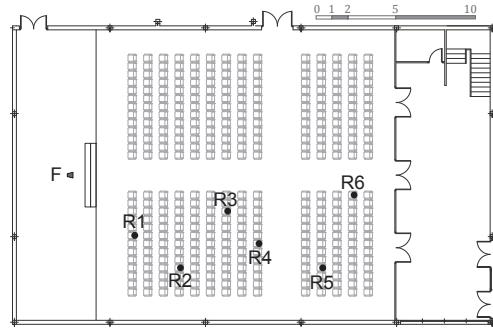


Figura 3. Planta del recinto, en la que se muestran las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R1 a R6).

Diseño de la Herramienta

Simulación acústica y auralización de las hipótesis

Se ha creado un modelo geométrico simplificado del salón (Figura 4), empleando un programa informático de modelado 3D. Dicho modelo está compuesto por 48 planos y tiene un volumen aproximado de 3127 m^3 . Posteriormente, se efectuó la exportación del modelo al programa de simulación acústico CATT-Acoustic [12] para simular su comportamiento acústico. Para ello, es necesario incorporar al modelo los coeficientes de absorción de los materiales existentes y ajustar, a través de un proceso iterativo, los coeficientes de absorción de aquellos materiales menos conocidos hasta conseguir “afinar” el modelo. El objetivo de este proceso es que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente no difiera en más de 1 JND (just noticeable difference), 5% para T [1], del correspondiente valor experimental.

Una vez conseguido el modelo “afinado”, se simulan cada una de las hipótesis planteadas para obtener los parámetros acústicos que caracterizan la sala (ver Tabla 3) y las auralizaciones asociadas a cada una de ellas.

Tabla 2. Coeficientes de absorción acústica asociados a los materiales utilizados en la simulación.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Hormigón	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
Corcho	0.05	0.10	0.20	0.55	0.60	0.55
Panel perforado TOPAKUSTIC	0.38	0.86	0.98	0.95	0.73	0.54
Cortina gruesa de terciopelo	0.30	0.45	0.65	0.56	0.59	0.71
Techo acústico Knauf Cleaneo	0.55	0.65	0.60	0.65	0.60	0.65
Butacas medianamente tapizadas vacías	0.36	0.47	0.57	0.62	0.62	0.60
Butacas medianamente tapizadas ocupadas	0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83
Puertas de madera tapizadas de espuma*	0.10	0.14	0.20	0.30	0.40	0.50
Pantalla de proyección microperforada*	0.64	0.56	0.41	0.28	0.13	0.06
Vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04

* Coeficientes de absorción estimados mediante el proceso iterativo de calibración del modelo.

**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

Tabla 3. Valores promedio espectral obtenidos para los puntos receptores R2 y R6.

	Inicial		Ocupado		Hip.1		Hip.2		Hip.3		Hip.4	
	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6
T30m [s]	1,13	1,09	1,00	0,97	2,30	2,17	2,06	1,80	1,93	1,29	0,56	0,61
C80m [s]	3,35	4,03	4,41	5,38	-0,6	0,45	5,84	5,33	9,38	7,13	10,0	10,7
STI	0,60	0,62	0,62	0,65	0,50	0,52	0,70	0,71	0,76	0,78	0,77	0,79

En lo que concierne a las auralizaciones, cabe destacar que se han tomado como referencia los puntos receptores R2 y R6 por la posición que presentan respecto al escenario donde se sitúa la fuente emisora. Los sonidos anecóicos utilizados corresponden a una voz humana femenina y una pieza musical interpretada por un chelo.

Las auralizaciones han sido obtenidas considerando que la audiencia se encuentra de frente observando la fuente. No obstante, con el fin de introducir los conceptos de audición binaural y HRTF en la herramienta educativa, se han incluido en la hipótesis 4, a modo de ejemplo, dos auralizaciones más para cada sonido anecóico. Ello permitirá al usuario virtual poder percibir el efecto de la orientación de la cabeza con respecto a la fuente: se han implementado giros de 45 y 90 grados.

Simulación visual e integración multisensorial

Al igual que en el paso anterior, es necesario partir del modelo geométrico simplificado para crear un modelo visual de la sala mediante el uso del software Sketchup 3D [14]. Sin embargo, en este caso se ha de conseguir el grado de realismo deseado y para ello se deben añadir detalles visualmente significativos del recinto. Se incluyen, por tanto, los elementos del techo, las puertas, ventanas, los dispositivos electroacústicos y los lumínicos, de manera que el modelo de la sala se mejore adquiriendo profundidad visual y ajustándose, en la medida de lo posible, a la realidad. A continuación se introducen en el modelo las texturas con el fin de obtener el resultado visual definitivo. Para ello es necesario realizar un post-procesado de las fotografías tomadas in situ en el recinto. En este punto ya es posible adquirir detalles tan ínfimos que no podrían ser modelados geométricamente. Finalmente se simula la iluminación del recinto, tomando como referencia las lámparas existentes en el mismo.

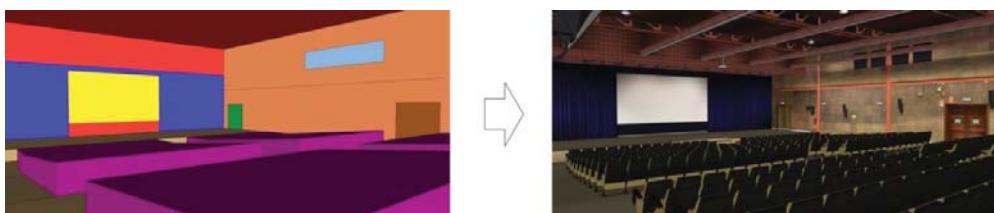


Figura 4. Modelo geométrico simplificado (izquierda) y modelo visual detallado (derecha).

Una vez obtenido el modelo visual de la situación actual, se modificará para crear otros modelos que representen los escenarios de cada una de las hipótesis consideradas (Figura 5). Para cada escenario se deben preparar las imágenes e incluir las texturas de los materiales incluidos en cada hipótesis.

Posteriormente, los modelos visuales y las auralizaciones obtenidas del modelo acústico, se importan en el software de realidad virtual Worldviz Wizard [15] a fin de poder crear la aplicación virtual. En este proceso de diseño, es necesario definir cómo integrar adecuadamente los elementos importados, enlazando en el entorno virtual cada escenario visual con sus correspondientes condiciones acústicas y con las posiciones de audio auralizadas.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

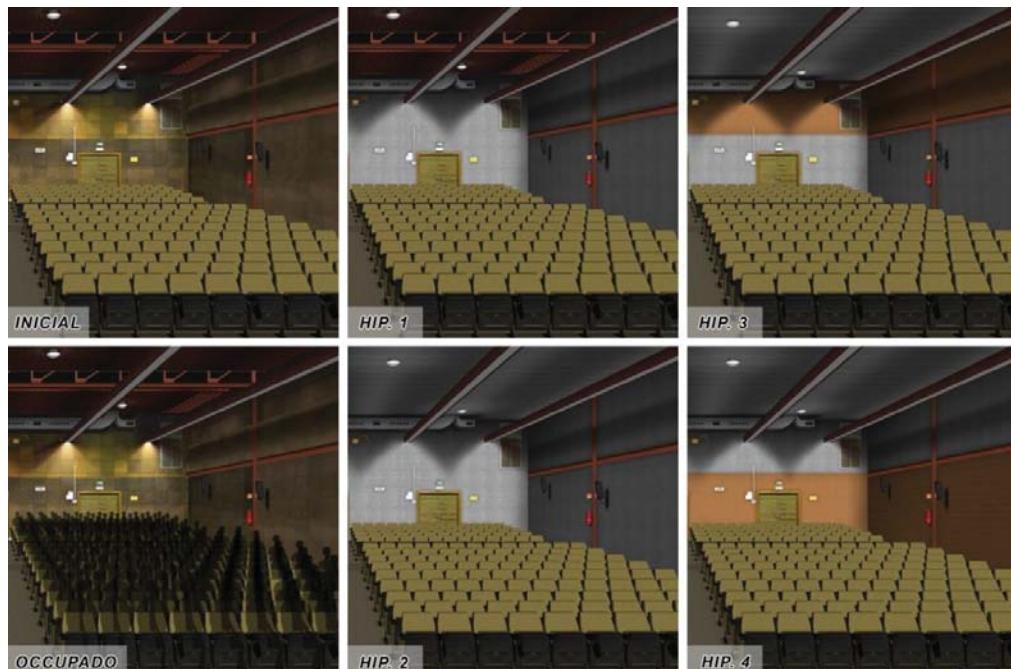


Figura 5. Escenarios visuales correspondientes a las hipótesis definidas.

Interfaz de la herramienta e interactividad del usuario

Dado que se trata de una herramienta diseñada para que pueda ser fácilmente distribuible y accesible a los alumnos, la aplicación virtual puede trabajar en modo no inmersivo, simplemente con el uso de un ordenador con elementos básicos de entrada y salida, como son la pantalla, los altavoces, el teclado y el ratón.

La herramienta se visualiza a pantalla completa y dispone de un interfaz que incluye 4 elementos gráficos accesibles al usuario (Figura 6):

1. El campo de visión del usuario virtual situado en el interior de la sala.
2. Un menú desplegable ubicado en la parte superior de la pantalla que permitirá al usuario escoger los escenarios y las condiciones acústicas auralizadas.
3. Un botón de información localizado en la parte superior derecha de la pantalla. Al presionarlo, se accede a una ventana adicional en la que se ofrece información acerca de los aspectos acústicos y materiales empleados en el escenario activo.
4. Una pequeña ventana de información situada en la parte inferior del botón de información que aparecerá cuando el usuario escuche las auralizaciones. En ella se mostrará el valor del tiempo de reverberación promediado espectralmente.

El desplazamiento del usuario en el entorno virtual es uno de los principales aspectos del diseño interactivo. En este caso, el usuario tiene la capacidad de navegar libremente por el entorno virtual mediante el uso de los botones del teclado habilitados para ello. Igualmente es posible rotar la vista con el ratón (6 degrees of freedom). Además, se ofrece la posibilidad al usuario de situarse directamente en las posiciones predefinidas de escucha (R2 y R6) eligiendo esta opción en el menú desplegable.

**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

Por último, y para dar cumplimiento al último requisito establecido en el diseño de la herramienta, ésta debe ser fácilmente distribuible y accesible a los alumnos.

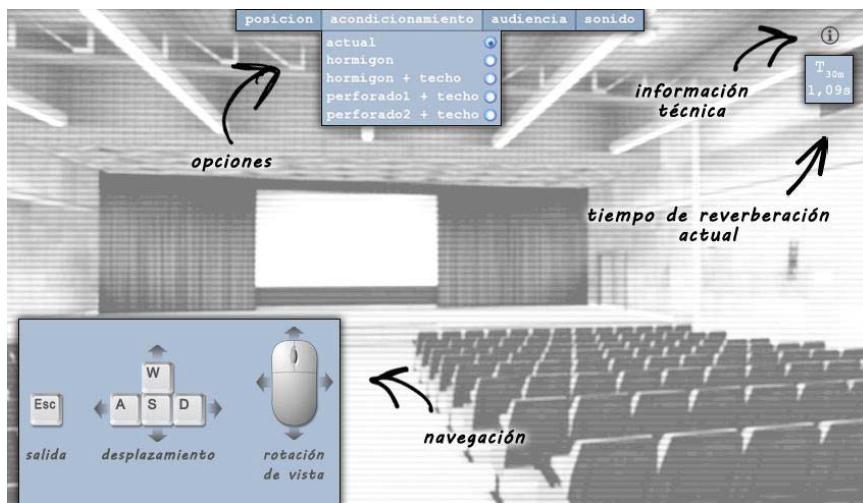


Figura 6. Captura de pantalla de la herramienta en la que se señalan los elementos de interacción.

El software de realidad virtual Worldviz Wizard permite exportar la herramienta desarrollada como un archivo ejecutable (.EXE package). En él se incluyen todos los scripts y archivos pertenecientes a las auralizaciones y al modelo visual, de modo que la herramienta puede ejecutarse en cualquier ordenador sin necesidad de disponer de ningún software específico para ello. Así pues, la herramienta diseñada puede publicarse en la página web de la asignatura a la que tengan acceso los alumnos. Asimismo, se pondrá a disposición pública una versión limitada de la herramienta en internet¹.

RESULTADOS

La herramienta interactiva obtenida ha sido diseñada para facilitar el aprendizaje de la acústica de salas. Su elaboración ha sido posible gracias al empleo de técnicas de realidad virtual que permiten reproducir entornos de forma realista. En consecuencia, la aplicación permite experimentar diferentes soluciones de acondicionamiento acústico y evaluarlas desde el punto de vista sensorial (visual y auditivo) y paramétrico. La herramienta se empleará durante el curso académico 2013/2014 en las asignaturas de acústica de la ETS de Arquitectura de la Universidad de Sevilla y estará disponible online para que los alumnos puedan practicar con ella desde su propio ordenador.

DISCUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Puesto que la herramienta interactiva será accesible a los alumnos durante el curso académico 2013/2014, los estudios futuros irán destinados a analizar el posible impacto que supondrá en el aprendizaje de la materia y la opinión que ésta merece a los alumnos. Igualmente, atendiendo a los resultados obtenidos durante su aplicación, será posible una mejora de la misma, incluyendo nuevos materiales y mayor información. Por último, se planteará su uso empleando la estación de realidad virtual inmersiva del Dpto. Física Aplicada II de Universidad de Sevilla, lo que permitirá futuras investigaciones sobre la percepción auditiva.

¹ <http://sounddimensions.eu/virtualsalon>



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA EUROPEAN SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL
ACOUSTICS AND NOISE MAPPING**

REFERENCIAS

- [1] Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, "UNE-EN-ISO 3382-1: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos," 2010.
- [2] Raúl Ancízar Munévar Molina and Josefina Quintero Corzo, "Investigación pedagógica y formación del profesorado," *OEI-Revista Iberoamericana de Educación*, 2000. [Online]. Disponible: <http://www.rieoei.org/deloslectores/054Ancizar.PDF>. [Visitada: 29-Aug-2013].
- [3] C. Dede, "Planning for neomillennial learning styles," *Educause Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 7–12, 2005.
- [4] A. G. Abulrub, A. N. Attridge, and M. A. Williams, "Virtual reality in engineering education: The future of creative learning," *Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2011 IEEE*, 2011, pp. 751–757.
- [5] A. Z. Sampaio, P. G. Henriques, and O. P. Martins, "Virtual Reality Technology Used in Civil Engineering Education," *Open Virtual Reality Journal*, vol. 2, pp. 18–25, 2010.
- [6] C. J. Chen, "The design, development and evaluation of a virtual reality based learning environment," *Australasian Journal of Educational Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 39–63, 2006.
- [7] D. Schröder, F. Wefers, S. Pelzer, D. Rausch, M. Vorländer, and T. Kuhlen, "Virtual Reality System at RWTH Aachen University," *International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010*, Melbourne, Australia, 2010.
- [8] R. Montell, J. Segura, A. Planells, A. Barba, S. Cerdá, R. Cibrián, R. Lacatis, and A. Giménez, "Simulación Acústica de Auditórios y Edificios Patrimoniales. Integración con Entornos de Realidad Virtual," *International Seminar on Virtual Acoustics – ISVA 2011*, Valencia, Spain, 2011, pp. 185–193.
- [9] L. Maffei, M. Masullo, and S. Basturk, "Potentialities of the Immersive Virtual Reality in Environmental Noise Annoyance Studies," *42nd Spanish National Congress on Acoustics - TecniAcustica 2011*, Cáceres, Spain, 2011.
- [10] S. Basturk, R. Carafa, and L. Maffei, "The Validation of Architectural and Acoustic Projects to Transform Ecclesiastical Architecture in Auditoria for Concert Music," *1st European Congress on Sound and Vibration - EAA EuroRegio 2010*, Ljubljana, Slovenia, 2010.
- [11] L. Álvarez, M. Galindo, T. Zamarreño, and S. Girón, "Análisis comparativo de tres sistemas para la medida de respuestas impulsivas," *Acústica 2012*, Évora, Portugal, 2012.
- [12] B.-I. Dalenbäck, *CATT-Acoustic v9.0 User's Manual*. Gothenburg, Sweden, 2011.
- [13] M. Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer, 2008.
- [14] Trimble, "SketchUp User's Guide." [Online]. Disponible: <http://help.sketchup.com/en/article/116174>. [Visitada: 23-Aug-2013].
- [15] Worldviz LLC, "Vizard 4.0 User's Manual." [Online]. Disponible: <http://docs.worldviz.com/vizard/>. [Visitada: 23-Aug-2013].



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO**

LA ACÚSTICA DE LAS CATEDRALES ANDALUZAS

PACS: 43.55.Gx

Álvarez-Morales, L.; Galindo, M.; Girón, S.; Zamarreño, T.
 Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC
 Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel.: + 34 954555979. Fax: +34 954557892.
 E-Mail: calvarez6@us.es, mgalindo@us.es, sgiron@us.es, teofilo@us.es

ABSTRACT

The growing interest over recent decades in acoustic behaviour of heritage buildings has been triggered by the focus on providing new information about their cultural character. This work describes the acoustic aspects of the main cathedrals of Andalusia, vast places of worship nowadays conceived as multifunctional enclosures capable of housing a large audience. Following a methodology based on measuring the monaural and binaural impulse responses, acoustic parameters are determined, associated with the various uses of each cathedral. The monumental size of these buildings and the characteristics of the materials used in their construction make cathedrals highly reverberant spaces.

RESUMEN

El interés en el comportamiento acústico de edificios patrimoniales se ha incrementado en las últimas décadas con el objetivo de aportar nueva información sobre su carácter cultural. Este trabajo describe el comportamiento acústico de las principales catedrales andaluzas, grandes espacios de culto concebidos hoy en día como recintos multifuncionales capaces de albergar una gran cantidad de público. Siguiendo una metodología basada en la medición de las respuestas al impulso monoaurales y binaurales, se determinan los parámetros acústicos asociados a los diversos usos actuales de cada catedral. El monumental volumen de estos edificios y las características de los materiales empleados en su construcción, hacen de las catedrales unos espacios altamente reverberantes.

INTRODUCCIÓN

Fruto de numerosos experimentos psicoacústicos en salas reales y con campos sonoros simulados, actualmente se conoce un número de atributos subjetivos descriptores de la experiencia de escucha del individuo patrón y sus correspondientes medidas objetivas asociadas. La mayoría de estos atributos son reconocidos como calificadores significativos de los aspectos rele-



44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

vantes de nuestra experiencia de percepción de la acústica de salas. Esta situación ha propiciado la estandarización de métodos de medida y muchos de los parámetros objetivos están ahora descritos en un apéndice de la norma redactada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [1], que también trabaja estrechamente con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en todas las materias de normalización electrotécnica.

Aunque la propagación del sonido en los recintos dedicados a la presentación de la música sinfónica y el discurso público han constituido el objetivo primordial de la acústica de salas y de la práctica acústica, las propiedades acústicas de los espacios religiosos han recibido también gran atención en la comunidad científica internacional desde el pionero trabajo publicado por Raes *et al.* [2]. Desde entonces se han sucedido numerosos trabajos relativos a aspectos acústicos de los espacios de culto de variada índole, señalamos algunos ejemplos: modelos semi-empíricos [3, 4], existencia de espacios acoplados en catedrales [5], tests de preferencia con sujetos [6], medidas de la absorción de los bancos ocupados [7], o de consultoría, rehabilitación y acondicionamiento acústico relativo a iglesias [8], mezquitas [9], y catedrales [10, 11]. En todos estos trabajos se han seguido los mismos procedimientos estandarizados establecidos para salas de concierto, drama y discurso público. En este contexto, destacan también la recopilación de Desarnaulds *et al.*, de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas [12], y el estudio de iglesias portuguesas llevado a cabo por Carvalho [13].

La acústica de las iglesias, y en especial de nuestras catedrales, es una herencia cultural (asociada a su patrimonio inmaterial) que debe ser preservada con el mismo esmero que los aspectos artísticos y arquitectónicos de esta particular categoría de edificios. Sin embargo, la complejidad de los espacios religiosos puede conducir a que los resultados de las diferentes investigaciones acústicas resulten incomparables. Para evitar diferentes aproximaciones al problema y ayudar a obtener datos comparables, un equipo investigador de tres universidades italianas, en el marco de un programa nacional sobre la acústica de los lugares de culto, y apoyándose en los requisitos expresados en ISO 3382-1 para salas de espectáculos, ha analizado estadísticamente los resultados experimentales derivados de su trabajo de campo para una mayor comprensión de la variación espacial de los parámetros acústicos. A partir de este análisis han desarrollado un conjunto de directrices [14], para normalizar las medidas acústicas en iglesias en lo que se refiere a la elección de las posiciones de la fuente, de los receptores y recomendaciones sobre el hardware apropiado dependiendo del propósito de la medida. En relación con esas directrices varios trabajos recientes han analizado la influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral de Valencia [15], y el efecto de la localización y direccionalidad de las fuentes en relación al estilo de la liturgia [16].

También los umbrales diferenciales especificados en la ISO para los parámetros acústicos han sido determinados con referencia a condiciones acústicas típicas en salas de conciertos y en salas para el discurso oral, cubriendo un rango de tiempos de reverberación desde 0.5 a 2 s. Los resultados de los tests de escucha realizados por Martellotta [17] para grandes recintos reverberantes, sugieren que el umbral diferencial de la claridad, C_{80} , es 1.5 ± 0.1 dB, independientemente de las variaciones del tiempo de reverberación y del tipo de música, y que para el tiempo central T_5 , su umbral debe ser expresado en términos porcentuales: el 8,5% del valor de referencia.

Con estos antecedentes, en este trabajo se describe fundamentalmente la metodología experimental seguida para el estudio acústico de las principales catedrales andaluzas: Cádiz (CA), Córdoba (CO), Jaén (JA), Málaga (MA) y Sevilla (SE). (Granada está pendiente por problemas burocráticos), lo que implica describir su campo acústico mediante la distribución espacio-temporal de la energía sonora, obtenida a partir del registro monoaural, binaural y tridimensional de las respuestas al impulso (RI) en su interior. El programa de medidas será usado para reunir una detallada descripción de las características acústicas de uno de los más importantes grupos de edificios patrimoniales de nuestra comunidad geográfica, que será usado para mejorar el conocimiento de la propagación del sonido dentro de estos edificios tipológicos, para preservar sus características originales en caso de restauración, y para determinar aproximaciones óptimas para mejorar las condiciones acústicas en estos entornos religiosos en los que la palabra y la música deben conciliarse.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO**

Tabla 1. Datos básicos de las catedrales andaluzas analizadas.

Catedral	Estilo	Construcción	Catalogación	Configuración
Cádiz	Barroco, rococó y neoclásico	1722-1853	BIC ^a : 1931	Gran cripta. Tres naves, crucero y girola. Capilla mayor a modo de rotunda. Capillas laterales y en cabecera.
Córdoba	Hispano-musulmán y renacentista	Mezquita: 786-988 Catedral: s. XVI	BIC: 1882 PH ^b : 1984	Mezquita: columnas con arquerías superpuestas. Catedral dispersa: nave central y crucero con capillas en límites. Capilla de Villaviciosa.
Jaén	Renacentista	1555-1724	BIC: 1931	Tres naves de igual altura con crucero que las atravesia. Capillas laterales y en cabecera.
Málaga	Renacentista	1528-1782	BIC: 1931	Tres naves, con la central de mayor altura y anchura, con crucero que las atraviesa. Capillas laterales.
Sevilla	Gótico tardío	1401-1507	BIC: 1928 PH: 1987 VUEU ^c : 2010	Cinco naves con crucero que las atraviesa. Capillas laterales.

^aAño de declaración Bien de Interés Cultural; ^bAño de declaración Patrimonio de la Humanidad; ^cAño de declaración Valor Universal Excepcional por la UNESCO

Dentro de la gestión integral del patrimonio cultural acometida por las administraciones responsables, en 1986 se inicia el Avance del Plan de Restauración y Ordenación de Catedrales de Andalucía, en el que se contemplaban diversos aspectos a considerar: conocimiento, intervención y difusión en torno a cada una de las trece catedrales andaluzas. Estos trabajos se incorporan en 1990 al Plan Nacional de Catedrales, en el que se pretenden establecer las necesidades de documentación y estudio que posibiliten el diagnóstico de las catedrales [18], y a partir de aquí se elaboran los Planes Directores de cada uno de los espacios que sirven de base a las actuaciones en los mismos. El conocimiento de su comportamiento acústico, supone la base de una novedosa aportación al carácter patrimonial del recinto, al incorporar la concepción acústica, frente a la óptica tradicional estilístico-funcional de estos espacios, como parte fundamental de su patrimonio inmaterial.

DESCRIPCIÓN DE LAS CATEDRALES

En casi todos los casos los nuevos espacios cristianos se han erigido, o incluso insertado como en el caso de Córdoba, sobre antiguas mezquitas, incrustándose así en la trama urbana y constituyéndose, a su vez, como elemento centralizador y dinamizador de dicha trama, incluso en nuestros días, facilitando soluciones nuevas a los problemas urbanísticos de los centros históricos que las rodean.

Las catedrales son edificios formalmente complejos, cuyos enormes volúmenes y soluciones estructurales y constructivas, confieren un carácter muy reverberante (ver Tablas 1 y 2) lo que se traduce en unas condiciones acústicas poco adecuadas para los usos litúrgicos y culturales que en ellas se desarrollan. Los materiales utilizados en la construcción, sin ánimo de ser exhaustivos, se repiten, si bien en cada caso aparecen peculiaridades concretas. Normalmente la piedra, de diferentes tipos, se utiliza en muros, columnas y bóvedas; el mármol aparece sistemáticamente en el suelo, algunos retablos de las capillas y parte de las columnas; la madera tiene una presencia repetida en todos los coros, retablos, órganos y portones de acceso y, excepcionalmente, en la cubierta entrevigada de la Mezquita en Córdoba; finalmente el enlucido de yeso aparece en algunos casos en capillas y bóvedas. El mobiliario principal

Tabla 2. Volumen aproximado y dimensiones características de las catedrales andaluzas analizadas.

Catedral	Volumen aprox. (m ³)	Longitud (m)	Anchura (m)	Alturas (m)		
				Nave central	Naves laterales	Máxima
Cádiz	70000	85	60	29	19	46
Córdoba	Mezquita	134700	179	128	13	---
	Catedral	22114	60	40	26	35
Jaén		85100	85	60	31	47
Málaga		118500	98	52	37	39
Sevilla		215000	116	76	35	40



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO**



Figura 1. Vista interior de las cinco catedrales estudiadas.

está constituido por bancos de madera y sillas de diferentes tipos y grados de tapizado, localizados en determinadas zonas de la planta destinadas a la ubicación de la audiencia. Existen diferencias notables en su distribución de uno a otro recinto. En la Figura 1 se presenta una vista interior de los cinco templos analizados.

Los cinco espacios catedralicios responden al denominado “modo español” por P. Navascués [19]. Un patrón que se mantiene y repite en el tiempo bajo diferentes aspectos estilísticos y que se exporta posteriormente a América desde Sevilla. En él se organiza el espacio a través de la secuencia altar-fieles-coro-trascoro-fieles. Esta organización funcional determina en muchos aspectos el comportamiento acústico de estos templos como tendremos ocasión de considerar más adelante.

METODOLOGÍA

Para la descripción del ambiente sonoro de las catedrales católicas del sur de España, a partir de las respuestas al impulso monoaurales binaurales y B-format, es necesario atender a los diferentes usos de cada recinto. Hoy en día, todos ellos, además de los usos litúrgicos, acogen usos musicales, no sólo los asociados a su vertiente religiosa, y otras numerosas actividades culturales, donde la percepción sonora juega un papel importante. En función de estos usos y condicionados por la tipología común de las catedrales estudiadas, se establecen en ellas diferentes zonas. La presencia en éstas de fieles o público en general, estará asociada a dichos usos, existiendo, además, una lógica interdependencia entre las diferentes zonas y la posición de la fuente sonora.

En general las fuentes sonoras analizadas se corresponden con: el altar mayor (FA), los púlpitos (FP), el coro (FC), el órgano (FO) y el trascoro (FT). A nivel particular, cada catedral tiene establecido un calendario a lo largo del año, dentro del ámbito pastoral y litúrgico, que supone en todas ellas la aparición temporal de nuevos focos sonoros y zonas de uso, asociados a los diferentes montajes efímeros (Semana Santa, Corpus Christi, Inmaculada Concepción,...). En el presente estudio se han descartado las numerosas capillas asociadas a estos recintos, otros espacios anejos, a veces de alta significación, así como el análisis de los diferentes sistemas electroacústicos.

Así mismo, se han consignado seis zonas de uso: la Zona A corresponde al altar mayor y presbiterio, donde se ubica el oficiante y ocasionalmente coros y/o agrupaciones musicales; la Zona B corresponde al coro, donde tienen lugar misas que pueden ser acompañadas de pequeños grupos musicales; la Zona C integra los bancos situada en el transepto y en los laterales del altar mayor; la Zona D integra la parte de las naves laterales adyacentes al coro y en las que suelen colocarse bancos; la Zona E hace referencia al trascoro y parte posterior de las naves laterales adyacentes al mismo y donde, ocasionalmente, se celebran misas y actividades culturales y, por último, la Zona F asociada al deambulatorio. En la Tabla 3 se puede ver la relación entre zonas de uso y las fuentes sonoras implicadas en cada catedral. Esta información se ha utilizado para ubicar los puntos receptores considerados para cada posición de fuente.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA**

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

Tabla 3. Fuentes sonoras y zonas de uso asociadas a cada catedral. (X= todas las catedrales).

Fuente	Zona A Altar mayor	Zona B Coro	Zona C Transepto + Lat. altar	Zona D Lateral del coro	Zona E Trascoro	Zona F Deambulatorio
FA	X	X	X	X		CA, JA, MA
FP	X	X	X	X		CA, JA, MA
FC		X				
FO	X	X	X	X	X	X
FT					X	

Tabla 4. Fuente, receptores y respuestas al impulso registradas en las catedrales.

Catedral	Cádiz	Córdoba	Jaén	Málaga	Sevilla	Total
Fuentes	7	6	6	5	5	26
Receptores	56	68	68	47	58	281
RI	224	272	272	188	248	1140

La cadena experimental utilizada en las medidas de campo de las catedrales corresponde a la *configuración avanzada* que señala Martellotta en [14] y, además, se ha medido el ruido de fondo para medidas de STI basadas en la respuesta al impulso.

El proceso de excitación, adquisición y análisis de las respuestas al impulso se realizó con el programa WinMLS2004 a través de la tarjeta de sonido Edirol UA-101. Para emitir las señales sinusoidales de barrido en frecuencia, generadas por el software, se usó una fuente dodecaédrica AVM DO-12 junto con un amplificador de potencia B&K 2734, suplementada por un subwoofer Beringher Eurolive B1800D-Pro autoamplificado, con el objetivo de mejorar la relación señal ruido a bajas frecuencias. En cada punto de recepción se registraron las RIIs monoaurales mediante un micrófono multipatrón (omnidireccional y figura de ocho) Audio-Technica AT4050/CM5 conectado a una fuente de polarización Sound Field SMP200 de 4 canales. Para el registro de las RIIs binaurales se utilizó el simulador de torso de Head Acoustics HMS III (Código 1323) junto con el acondicionador de señal OPUS 01dB (sustituido en algunos casos con el B&K-2829 de 4 canales). Las respuestas B-format se registraron utilizando el sistema MKV de SoundField, aunque en este trabajo no se presentan resultados asociados a ellas. En el caso de Sevilla, la primera en ser medida, no se utilizó el subwoofer, el amplificador de potencia fue el INTER-M 1000 y la fuente de polarización la Earthworks-LAB 1. En la Tabla 4 se resumen el trabajo de campo realizado indicando el número de fuentes utilizadas, el de receptores y el número de emisiones de barrido realizadas en cada catedral y en la Tabla 5 se expone la información aportada en la norma UNE-ISO 3382-1 [1] a la que se ha incorporado otras propuestas, algunas de ellas específicamente desarrolladas para su aplicación a grandes espacios reverberantes.

Las medidas se llevaron a cabo con los templos desocupados y en periodo nocturno, para minimizar los efectos del ruido de fondo. Se monitorizaron las condiciones ambientales midiendo las medidas de temperatura y humedad relativa.

Tabla 5. Aspectos subjetivos del oyente, parámetro acústico relacionado, bandas usadas para el promedio espectral y umbrales diferenciales en grandes espacios reverberantes.

Aspecto subjetivo del oyente	Magnitud acústica	Promedio espectral (Hz)	Umbral diferencial (JND)
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación inicial, EDT (s) Tiempo central, T_5 (ms)	500 - 1000 500 - 1000	5% (relativo) 8,5% ^b (relativo)
Claridad percibida del sonido	Claridad, C_{80} (dB) Definición, D_{50}	500 - 1000 500 - 1000	1,5 dB ^b 0,05
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora, G (dB)	500 - 1000	1 dB
Envolvente del oyente (LEV)	Nivel sonoro lateral final, L_J (dB)	125 - 1000	1 dB ^c
Ancho aparente de la fuente (ASW)	Fracción de energía lateral precoz, λ_F Coeficiente de correlación cruzada interaural precoz IACC _E	125 - 1000 500 - 2000 ^d	0,05 0,075

^aPromediado aritmético de las bandas de octava, excepto para L_J que se promedia en energía. ^bSegún Martellotta [17]. ^cSegún Vorländer [20].

^dSegún Okano *et al.* [21].



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO**

RESULTADOS

En primer lugar, Figura 2, se presentan los valores del tiempo de reverberación, T_{30} , promediados espacialmente para la posición de la fuente más significativa (FA), frente a la frecuencia, para comparar las características reverberantes de todos los templos. Se puede apreciar que las catedrales de Sevilla y Córdoba son las menos reverberantes, resultado sorprendente en el caso de Sevilla, la de mayor volumen, y no tanto en el caso de la de Córdoba si tenemos en cuenta lo que hemos citado de la cubierta de la Mezquita. Similares volúmenes y tiempos de reverberación presentan las catedrales de Málaga y Jaén, siendo la más reverberante la catedral de Cádiz, especialmente a bajas frecuencias, a pesar de poseer el menor volumen. Los altos valores de todas ellas se justifican por el predominio de la piedra en el interior, y las notables diferencias ponen de manifiesto el distinto comportamiento acústico de ésta, motivado por las diferencias físico-químicas, en función de las canteras de procedencia. En el caso de la catedral de Sevilla, la piedra presenta unas características de porosidad singulares, que le hace ser, a pesar de su volumen, menos reverberante [22].

Con objeto de ampliar la descripción acústica de los espacios, atendiendo a los aspectos subjetivos del oyente, en la Tabla 6, se presentan los promedios espaciales y espectrales para la fuente FA de los parámetros acústicos. De nuevo, la catedral de Sevilla presenta los valores más adecuados respecto de las demás si consideramos el gran volumen que posee. Los resultados de los parámetros se encuentran fuera del rango típico especificado en [1] para salas de conciertos y polivalentes vacías de hasta 25000 m³, a excepción de los parámetros de espacialidad que se encuentran en la parte inferior del rango.

En la Figura 3 se muestran los resultados promediados espectral y espacialmente en sus correspondientes zonas de influencia, para cuatro posiciones de la fuente (altar mayor, púlpito, coro y trascoro) en cada catedral y para los 5 parámetros monaurales, EDT, C_{80} , G , L_J , J_{LF} , y el parámetro de inteligibilidad de la palabra, RASTI. En la representación de EDT destacan los inferiores valores del parámetro para todas las fuentes en las catedrales de Córdoba y Sevilla, y, cómo en el resto de catedrales, en el trascoro el tiempo de reverberación inicial es bastante inferior que para las otras posiciones de la fuente, obteniéndose reducciones de hasta más de 3s, como es el caso de la catedral de Cádiz. Esta mejoría de las condiciones acústicas en términos de la reverberación se repite también con valores más elevados de la claridad musical,

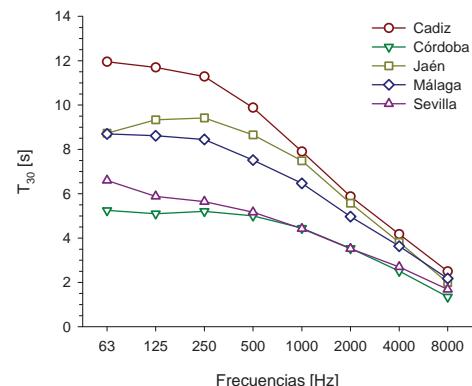


Figura 2. Valores de T_{30} frente a la frecuencia, promediados espacialmente, para la fuente en el altar (FA) en todas las catedrales.

Tabla 6. Valores de los parámetros acústicos, promediados espacial y espectralmente, para cada catedral, medidos con la fuente situada en el altar mayor (FA).

Parámetros	Cádiz	Córdoba	Jaén	Málaga	Sevilla
T_{30m} [s]	8,89	4,73	8,07	7,00	4,79
EDT_m [s]	8,62	4,61	7,54	6,65	3,67
T_{5m} [ms]	610,46	307,00	514,85	439,75	240,16
C_{80m} [dB]	-8,44	-4,35	-7,13	-6,20	-2,18
D_{50m}	0,12	0,25	0,15	0,19	0,32
G_m [dB]	1,87	3,40	2,18	0,09	-5,03
L_{Jm} [dB]	-2,51	-3,27	-3,53	-6,20	-11,44
J_{LFm}	0,16	0,15	0,17	0,19	0,12
BR_m	1,29	1,09	1,16	1,22	1,20
Br_m	0,57	0,64	0,58	0,62	0,65
IACCE _m	0,47	0,50	0,47	0,50	-
IACCL _m	0,11	0,13	0,11	0,11	-
RASTI	0,25	0,37	0,31	0,31	0,44

**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA**

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

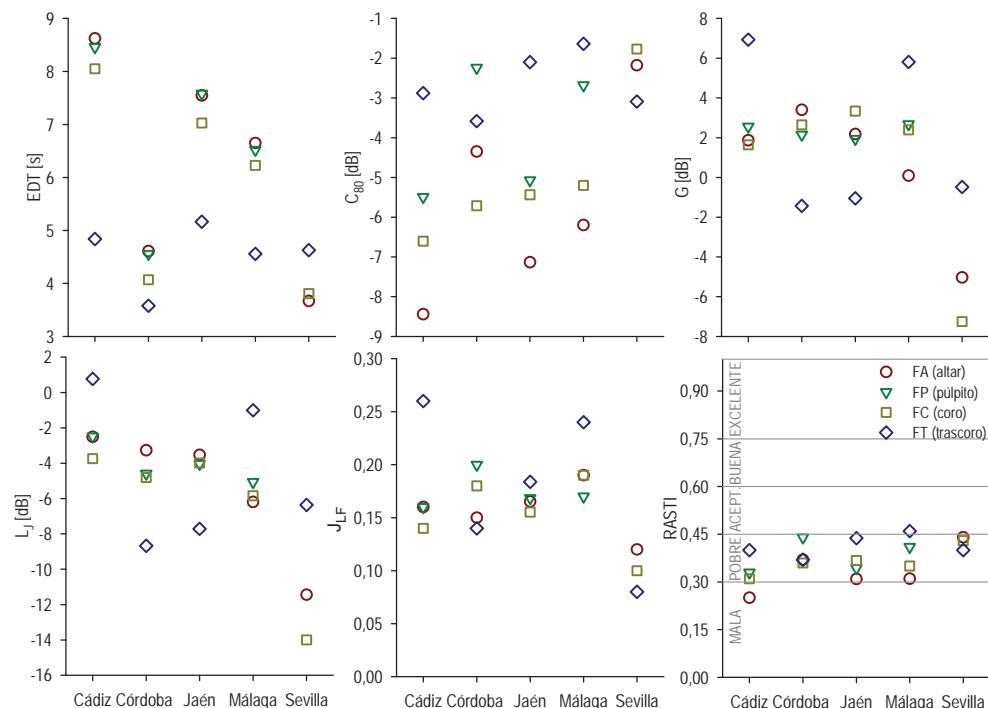


Figura 3. Valores de los parámetros acústicos, promediados espectral y espacialmente para cada fuente, medidas en las cinco catedrales.

fuerza sonora, e impresión espacial en el trascoro, en especial en las catedrales de Cádiz y Málaga que siguen un patrón casi idéntico. La razón de este comportamiento se debe a que el trascoro se configura como un espacio independiente de la catedral en la que las distancias involucradas son más cortas y con menor influencia de sus naves, bóvedas y cúpulas. En los parámetros de espacialidad y fuerza sonora la catedral de Sevilla se encuentra en el rango más desfavorable de todas las catedrales. El índice RASTI se sitúa para todas las fuentes y catedrales dentro del rango de inteligibilidad pobre con ligeras variaciones rozando el límite de aceptable en el trascoro y púlpito en algunas catedrales.

CONCLUSIONES

Las catedrales andaluzas son edificios de una complejidad formal extraordinaria erigidos en su mayoría sobre solares de antiguas mezquitas, o incluso incrustadas en ellas. Todas responden al denominado “modo español” y han sido declaradas, al menos, bienes de interés cultural a lo largo de los últimos dos siglos. Sus condiciones acústicas forman parte de su patrimonio inmaterial asociado y deberían ser preservadas al igual que sus aspectos artísticos y arquitectónicos. Con este fin se describe en este trabajo el método experimental seguido para caracterizar el campo sonoro natural de estos espacios, en las posiciones de fuentes-receptores asociadas a sus usos litúrgicos, culturales y musicales. La cadena experimental descrita obedece el procedimiento de normalización expuesto en la UNE-EN-ISO 3382-1:2010, y otras directrices específicas para recintos de culto basadas en amplias medidas de campo. Se presentan también aquí los grandes rasgos de sus tipologías y variables arquitectónicas, así como los descriptores acústicos especificados en la mencionada norma para valorar la percepción de la música y la palabra. Los resultados muestran que aún siendo recintos muy reverberantes pueden establecerse diferencias entre ellos asociadas a sus materiales de acabado y ajuar litúrgicos así como diferencias dentro de los posibles subespacios que los conforman.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA**

**EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO
AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento a los deanes de las catedrales por facilitarnos el acceso para la realización de las medidas. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y por el proyecto I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).
- [2] A. C. Raes, G. Sacerdote. "Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas," J. Acoust. Soc. Am. 25, 925-961 (1953).
- [3] T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo. "Acoustic energy relations in Mudéjar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. 121, 234-250 (2007).
- [4] E. Cirillo, F. Martellotta. "Sound propagation and energy relations in churches," J. Acoust. Soc. Am. 118, 232-248 (2005).
- [5] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson. "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London". J. Sound Vib. 236, 209-225 (2000).
- [6] F. Martellotta. "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches". J. Sound Vib. 317, 378-399 (2008).
- [7] F. Martellotta, M. D'Alba. "On site validation of sound absorption measurements of occupied pews". Appl. Acoust. 72, 923-933 (2011).
- [8] A. M. Bueno, A.L. León, M. Galindo. "Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid". Arch. Acoust. 37, 435-446 (2012).
- [9] R. N. Hammad. "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan". Appl. Acoust. 30, 335-345 (1990).
- [10] D. L. Klepper. "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music". J. Acoust. Soc. Am. 99, 417-425 (1996).
- [11] R. Suárez; J.J. Sendra, J. Navarro, A. L. León. "The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. proposals for architectural intervention". Acta Acust. United Acust. 90, 362-375 (2004).
- [12] V. Desarnoulds, K. Eggenschwiler, S. Bossoney. "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"). Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711 (1998).
- [13] A. P. O Carvalho. "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches". Appl. Acoust. 58, 33-49 (1999).
- [14] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi. "Guidelines for acoustical measurements in churches". Appl. Acoust. 70, 378-388 (2008).
- [15] R. Montel, A. Gimenez, S. Cerdá, J. Segura, R.M. Cibrian, A. Barba. "Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia". Proceedings of Acústica 2012 Évora, Portugal.
- [16] Y. Soeta, K. Ito, R. Shimokura, S. Sato, T. Ohsawa, Y. Ando. "Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches". J. Acoust. Soc. Am. 131, 1206-1220 (2012).
- [17] F. Martellotta. "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". J. Acoust. Soc. Am. 128, 654-663 (2010).
- [18] José Cuaresma-Pardo. "Sedes catedralicias en Andalucía: estado de la cuestión 1984-2004. PH, 47" (disponible en <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/issue/view/46#.UdRdtG3BKd9>)
- [19] P. Navascués-Palacio. "Catedrales de España". Barcelona: Ed. Lunwerg; 2010.
- [20] M. Vorländer. "Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality". 1st ed. Berlin: Springer-Verlag; 2008.
- [21] T. Okano, L.L. Beranek, T. Hidaka. "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls". J. Acoust. Soc. Am. 104, 255-265 (1998).
- [22] R. M. Esbert, J. Ordaz, J. J. Alonso, V. G. Ruiz de Argandoña, M. Montoto, R. Marcos, L. Valdeón. "Petrophysical characterization and weatherability of the stones of the Seville cathedral". Materiales de Construcción 38, 5-23 (1988).



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

ÍNDICES ACÚSTICOS GLOBALES EN GRANDES ESPACIOS DE CULTO

PACS: 43.55.Gx

Girón, S.; Zamarreño, T.; Álvarez-Morales, L.; Galindo, M.
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC.
Avda. Reina Mercedes 2,
41012 Sevilla, España.
Tel.: + 34 954557129. Fax: +34 954557892.
E-Mail: sqiron@us.es, teofilo@us.es, calvarez6@us.es, mgalindo@us.es.

ABSTRACT

This paper presents a method to synthesize the acoustic assessment of large reverberant places of worship for two types of sound stimuli: music and speech. The proposed synthetic indices are derived from the spectrally and spatially averaged values of various acoustic parameters, related to the attributes of perceived sensation and widely considered in other acoustic studies. Partial indices associated with each parameter are determined by comparing its average value with its range of optimum values and its environment of acceptable values that are set according to their respective differential thresholds (JND). The methodology implemented is applied to the acoustic assessment of five cathedrals of Andalusia.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un método para sintetizar la valoración acústica de grandes espacios reverberantes de culto para dos tipos de estímulos sonoros, la música y la palabra. Los índices sintéticos propuestos se obtienen a partir de los valores promediados espectral y espacialmente de seis parámetros acústicos, relacionados con los atributos de la sensación percibida y ampliamente considerados en otros estudios acústicos. Los índices parciales asociados a cada parámetro se determinan comparando el valor medio de éste con su rango de valores óptimos y entorno de valores aceptables que se fija en función de los umbrales diferenciales (JND) respectivos. La metodología implementada se aplica a la valoración acústica de cinco catedrales de Andalucía.

INTRODUCCIÓN

La acústica de iglesias ha cobrado una creciente importancia desde hace algunas décadas por parte de la comunidad científica. Este interés se centra en varios aspectos: el valor histórico inmaterial del sonido de los espacios que está ligado a su creación arquitectónica; a las adaptaciones efímeras de estos recintos a eventos culturales que se comparten con fines litúrgicos; o finalmente como elementos de comprensión básica de la propagación del sonido



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

en estos a veces enormes volúmenes de gran complejidad espacial. Diversas campañas de medidas en iglesias de variada tipología y tamaño en varios países han dado lugar a un nutrido conjunto de resultados en este campo [1-4].

La norma UNE-EN-ISO 3382-1 [5] describe el procedimiento de medición, la instrumentación y procedimientos de obtención de los parámetros acústicos para la evaluación multidimensional de una sala de conciertos o espectáculos. Existen también métodos encaminados a representar la calidad acústica de una sala de conciertos mediante un único valor numérico; en este contexto destacan el método propuesto por Ando [6], y la adaptación del mismo llevada a cabo por Beranek [7]. La determinación de la calidad acústica mediante un único valor exige previamente seleccionar los parámetros acústicos estadísticamente independientes representativos de la sala. Los recintos de culto presentan características acústicas objetivas y subjetivas diferentes de las salas de conciertos y teatros, ya que no verifican las expectativas previstas en modelos de estos recintos, como han puesto de manifiesto varios autores [8, 9], y un tema reciente de investigación es la formulación de índices sintéticos para la acústica de estos edificios [10,11].

Inspirado en el estudio de Berardi [11], con modificaciones, en este trabajo se presenta un método para sintetizar la valoración acústica de grandes espacios reverberantes de culto para dos tipos de estímulos sonoros, la música y la palabra.

METODOLOGIA

La síntesis de los parámetros acústicos de salas en un solo índice requiere seleccionar los parámetros independientes y combinarlos teniendo en cuenta su importancia relativa. Partiendo de los parámetros acústicos validados en la ISO 3382-1 [5] y medidos en los espacios catedralicios, en este trabajo, siguiendo a Berardi [11], se proponen dos índices sintéticos uno para la *música* y otro para la *palabra* considerando, 5 características acústicas para valorar el sonido: *reverberación, calidad sonora, espacialidad, fuerza sonora y claridad*. En el trabajo de este autor la primera característica está representada por el parámetro EDT [12], la calidad sonora (que propondremos cambiar por *calidez sonora*) se expresa a través de BR y T_s , la espacialidad a través de dos parámetros J_{LF} e IACC_E, la fuerza sonora por G y la claridad por C₅₀. Todos estos parámetros están definidos en la norma ISO [5] a excepción de Bass Ratio: $BR = (T^{125Hz} + T^{250Hz}) / (T^{500Hz} + T^{1kHz})$ que ha sido introducido por Beranek [7].

En la muestra de iglesias a las que Berardi aplica su índice todos los parámetros acústicos mencionados son estadísticamente independientes. Sin embargo, en el caso de las catedrales que nos ocupa, el estudio de las correlaciones considerando los valores medios de los parámetros anteriores, medidos en condiciones de no ocupación [13], para las distintas posiciones de las fuentes y receptores asociados (ver Figura 1), muestran que existe una fuerte dependencia entre los parámetros EDT y T_s ($r^2=0.94$) (ver Tabla 1). Los autores del presente trabajo obtuvieron también conclusiones semejantes, relativas a estos dos mismos parámetros, en un conjunto de iglesias Gótico-Mudéjares [14]. En la Figura 2 se muestran, para mayor claridad, las correlaciones más fuertes encontradas, que tienen lugar entre los parámetros C₈₀ y C₅₀ Figura 2(a), la cual era previsible y corresponde a dos parámetros que están uno en el

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal (r^2) entre los parámetros analizados. En negrita valores de $r^2>0.6$.

	EDT	BR	T_s	J_{LF}	IACC _E	G	C ₈₀	C ₅₀
EDT	---	---	---	---	---	---	---	---
BR	0.2683	---	---	---	---	---	---	---
T_s	0.9426	0.2518	---	---	---	---	---	---
J_{LF}	0.0483	0.0758	0.0229	---	---	---	---	---
IACC _E	0.0882	0.0030	0.0553	0.2016	---	---	---	---
G	0.0219	0.0032	0.0148	0.3149	0.0051	---	---	---
C ₈₀	0.5537	0.0713	0.7583	0.0006	0.0066	0.0114	---	---
C ₅₀	0.4014	0.0569	0.6217	0.0018	0.0006	0.0159	0.9395	---



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

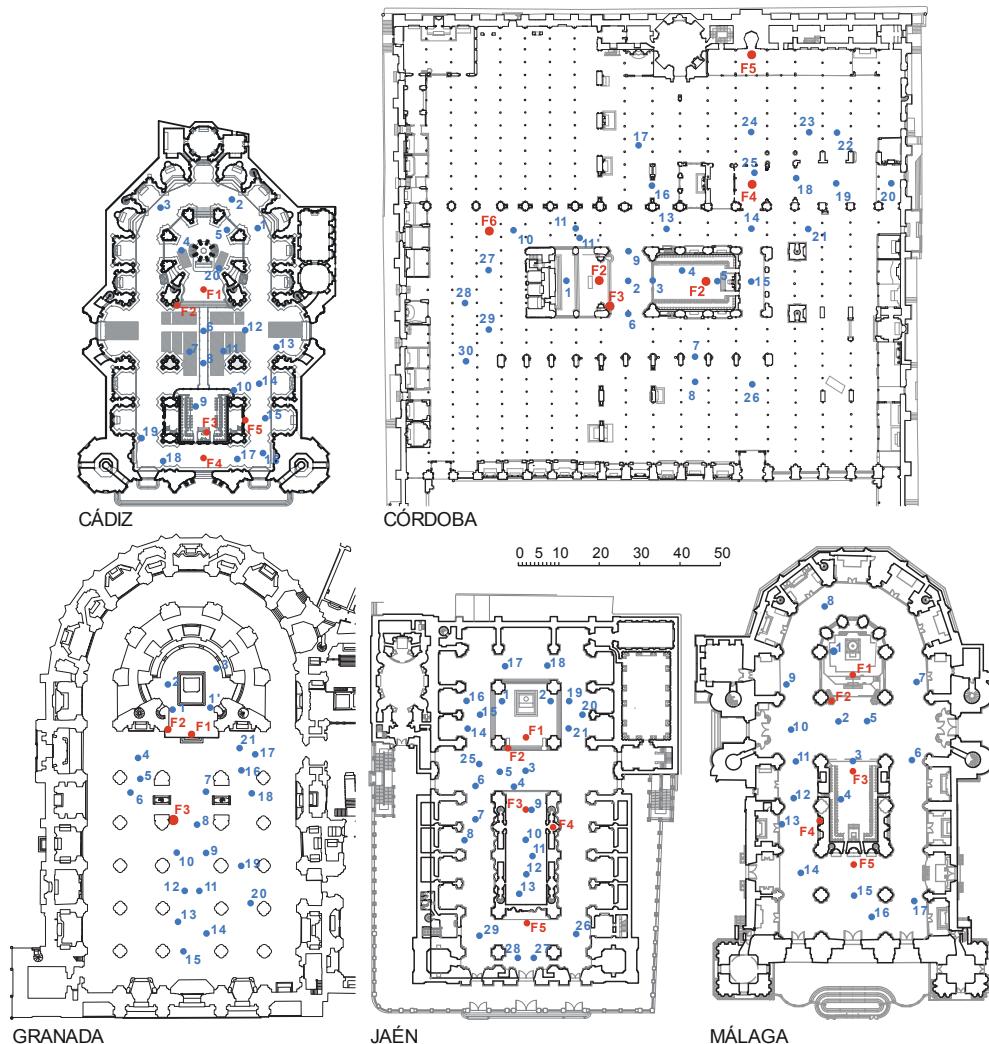


Figura 1. Planta de las cinco catedrales estudiadas a la misma escala, mostrando las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (numerosados).

grupo de evaluación de la música y el otro de la palabra, y en la Figura 2(b) entre los parámetros EDT y T_s .

En consecuencia, se propone suprimir el parámetro T_s de la lista de parámetros ortogonales descriptores de la calidad acústica y distribuir el peso que Berardi propone para él en la ecuación del índice global, entre el parámetro BR, en su mayor parte, y los parámetros de claridad. De este modo el aspecto que Berardi denomina calidad sonora, pasaría a ser *calidez sonora*, que es el aspecto que valora directamente BR. También, a diferencia de Berardi, en este trabajo, para la valoración de la claridad, se ha optado por utilizar C_{50} para el índice de la palabra y C_{80} para la música. En el primer caso, su relación con la inteligibilidad permite utilizar la escala de calificación de Marshall [15] para determinar el índice parcial asociado. Para obtener el índice parcial asociado a la claridad musical a partir de C_{80} se ha adaptado la escala de Kosala [16]. Vale la pena también comentar que aunque Okano et al. [17] han encontrado una fuerte correlación entre el parámetro binaural IACC_E y J_{LF} en salas de conciertos, en los



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

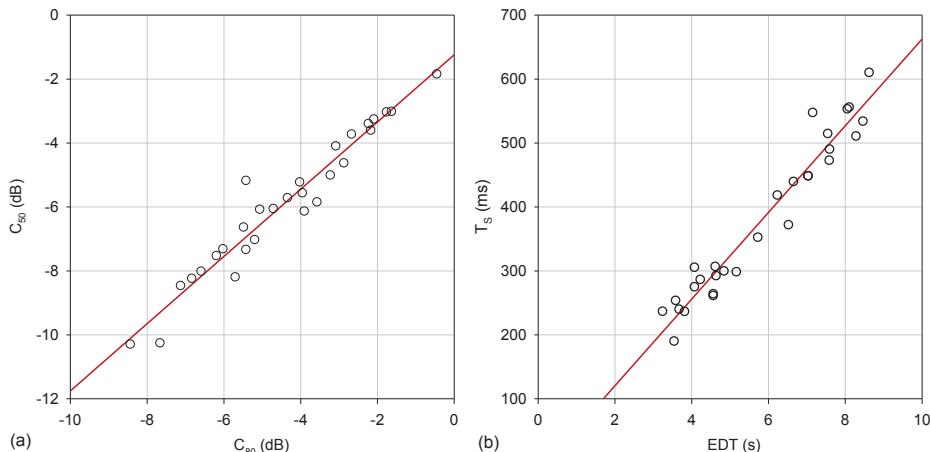


Figura 2. Regresión lineal, (a) entre C_{50} y C_{80} y (b) entre T_s y EDT, obtenidas en las catedrales andaluzas.

recintos religiosos no se observan estas correlaciones, como ha señalado Berardi en las iglesias italianas y en nuestro caso se muestra en la Tabla 1. Por esta razón se incluyen ambos parámetros para evaluar las características de espacialidad de los espacios de culto.

Los valores utilizados de los umbrales diferenciales, JND, de estos parámetros son los de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [5], el propuesto por Martellotta [7] para C_{80} en grandes espacios reverberantes y el de Marshall para C_{50} [15]. Los factores de ponderación de cada índice parcial para obtener el índice global para la música y la palabra son los mismos que los propuestos por Berardi, salvo lo ya señalado anteriormente a la supresión de T_s y al reparto de su peso entre BR y la claridad.

Se han adoptado también los mismos valores óptimos de los parámetros, considerando un rango ampliado, por arriba y por abajo si corresponde, incrementado en 1 JND: $P_{jopt} \pm JND_j$. Para los valores de los parámetros dentro del rango óptimo ampliado el índice parcial i_j , correspondiente al parámetro acústico j , vale 1. Fuera de este rango ampliado, el valor del índice parcial varía linealmente desde 1 hasta 0, de modo que el índice se anula cuando el parámetro disminuye/aumenta en 7 JND $_i$. La excepción a esta regla son los parámetros de lateralidad J_{LF} e IACC_E. En este caso el límite inferior de la variación lineal, para evitar incongruencias (valores positivos del índice parcial para valor nulo del parámetro), se considera que el índice parcial vale 0 cuando el valor del parámetro es 0. Estas consideraciones se resumen en la Tabla 2 y en el conjunto de ecuaciones mostradas en el Apéndice, que permiten calcular los índices parciales de cada parámetro, para la música y la palabra, y cuya representación conjunta se muestra en la Figura 3. A partir de los índices parciales calculados, el índice total se obtiene de acuerdo a la expresión $P = \sum_{j=1}^6 i_j a_j$, donde a_j se refiere al peso de cada parámetro mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de JND, pesos, y rangos óptimos para la palabra y la música de cada uno de los parámetros acústicos. Se indican las frecuencias utilizadas para evaluar el valor promedio espectral.

	EDT (s) (500-1k)	BR	J_{LF} (125-1k)	IACC _E (500-2k)	G (dB) (500-1k)	C_{80} (dB) (500-1k)	C_{50} (dB) (500-1k)
JND _j	5%	0.1	0.05	0.075	1 dB	1.5 dB	1.5 dB
a_j	0.25	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20	0.20
Valor óptimo para la música	2.1-4.2	1.10	> 0.25	> 0.35	> 3	>0	---
Valor óptimo la palabra	0.8-1	1.05	> 0.2	> 0.35	> 0	---	>0



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

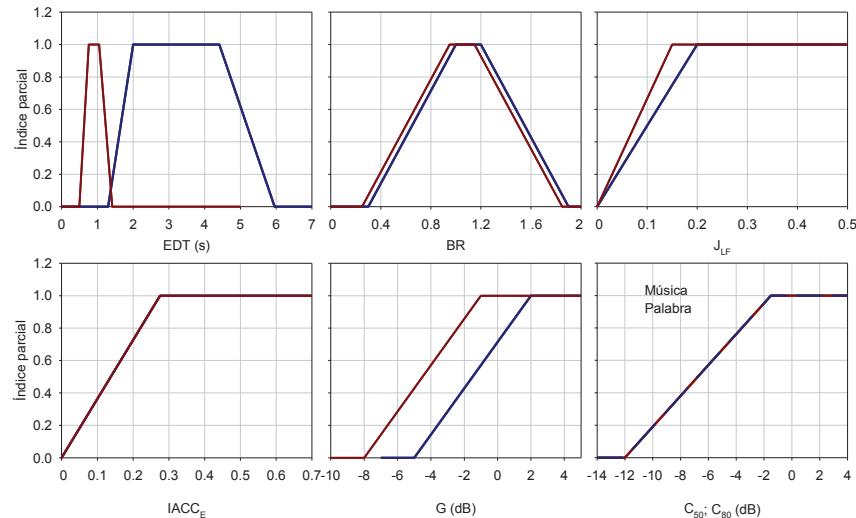


Figura 3. Representación gráfica de los seis índices parciales para la música y la palabra.

Tabla 3. Valores promedios espectral y espacialmente de los parámetros acústicos, valores calculados de los índices parciales asociados, para la música y para la palabra, asociados a cada posición de la fuente y para todas las fuentes, en cada catedral.

	F	nR	EDT	\bar{i}_{EDTm}	\bar{i}_{EDTp}	BR	\bar{i}_{BRm}	\bar{i}_{BRp}	J_{LF}	\bar{i}_{JLFm}	i_{JLFp}	$IACC_E$	\bar{i}_{IACCEm}	\bar{i}_{IACCEp}	G	\bar{i}_{Gm}	i_{Gp}	C_{80}	\bar{i}_{C80m}	C_{50}	\bar{i}_{C50p}
CÁDIZ	1	14	8.62	0	0	1.29	0.87	0.80	0.16	0.80	1	0.47	1	1	1.87	0.98	1	-8.44	0.34	-10.29	0.16
	2	11	8.46	0	0	1.29	0.87	0.80	0.16	0.80	1	0.55	1	1	2.56	1	1	-5.49	0.62	-6.63	0.51
	3	7	8.05	0	0	1.29	0.87	0.80	0.14	0.70	0.93	0.48	1	1	1.64	0.95	1	-6.60	0.51	-8.01	0.38
	4	4	4.84	0.72	0	1.31	0.84	0.77	0.26	1	1	0.30	1	1	6.93	1	1	-2.88	0.87	-4.62	0.70
	5	3	7.15	0	0	1.30	0.86	0.79	0.15	0.75	1	0.61	1	1	2.48	1	1	-7.67	0.41	-10.25	0.17
	T	39	7.42	0	0	1.30	0.89	0.79	0.17	0.85	1	0.48	1	1	3.10	1	1	-6.22	0.55	-7.96	0.38
CORDOBA	1	13	4.61	0.86	0	1.09	1	1	0.15	0.75	1	0.50	1	1	3.40	1	1	-4.35	0.73	-5.71	0.60
	2	7	4.07	1	0	1.10	1	1	0.18	0.90	1	0.43	1	1	2.65	1	1	-5.71	0.60	-8.19	0.36
	3	10	4.56	0.90	0	1.08	1	1	0.2	1	1	0.49	1	1	2.15	1	1	-2.24	0.93	-3.39	0.82
	4	8	3.24	1	0	1.01	1	1	0.16	0.80	1	0.54	1	1	5.06	1	1	-3.91	0.77	-6.13	0.56
	5	8	4.07	1	0	1.02	1	1	0.11	0.55	0.73	0.65	1	1	0.87	0.84	1	-3.96	0.77	-5.56	0.61
	6	4	3.58	1	0	1.06	1	1	0.14	0.70	0.93	0.44	1	1	-1.43	0.51	0.94	-3.58	0.80	-5.84	0.59
GRANADA	T	50	4.02	1	0	1.06	1	1	0.16	0.80	1	0.51	1	1	2.12	1	1	-3.96	0.77	-5.8	0.59
	1	18	8.1	0	0	1.16	1	0.99	0.21	1	1	0.18	0.65	0.65	-0.14	0.69	1	-6.84	0.49	-8.23	0.36
	2	18	8.28	0	0	1.16	1	0.99	0.2	1	1	0.23	0.84	0.84	-0.14	0.69	1	-4.72	0.69	-6.05	0.57
	3	12	7.03	0	0	1.15	1	1	0.15	0.75	1	0.23	0.84	0.84	3.34	1	1	-5.43	0.63	-5.17	0.65
	T	48	7.8	0	0	1.16	1	0.99	0.19	0.95	1	0.21	0.76	0.76	1.02	0.86	1	-5.66	0.6	-6.49	0.52
	1	21	7.54	0	0	1.16	1	0.99	0.17	0.85	1	0.47	1	1	2.18	1	1	-7.13	0.46	-8.46	0.34
JAÉN	2	17	7.58	0	0	1.15	1	1	0.17	0.85	1	0.47	1	1	1.94	0.99	1	-5.07	0.66	-6.07	0.56
	3	12	7.03	0	0	1.14	1	1	0.16	0.80	1	0.40	1	1	3.34	1	1	-5.43	0.63	-7.33	0.44
	4	11	7.59	0	0	1.16	1	0.99	0.19	0.95	1	0.45	1	1	2.08	1	1	-6.03	0.57	-7.31	0.45
	5	4	5.16	0.51	0	1.18	1	0.96	0.18	0.90	1	0.46	1	1	-1.05	0.56	0.99	-2.10	0.94	-3.25	0.83
	T	65	6.98	0	0	1.16	1	0.99	0.17	0.85	1	0.45	1	1	1.70	0.96	1	-5.15	0.65	-6.47	0.53
	1	16	6.65	0	0	1.22	0.97	0.9	0.19	0.95	1	0.50	1	1	0.09	0.73	1	-6.2	0.55	-7.52	0.43
MÁLAGA	2	11	6.52	0	0	1.21	0.99	0.91	0.17	0.85	1	0.50	1	1	2.68	1	1	-2.68	0.89	-3.72	0.79
	3	13	6.23	0	0	1.21	0.99	0.91	0.19	0.95	1	0.44	1	1	2.40	1	1	-5.2	0.65	-7.02	0.47
	4	7	5.72	0.15	0	1.22	0.97	0.90	0.17	0.85	1	0.46	1	1	0.45	0.78	1	-3.23	0.84	-5	0.67
	5	4	4.56	0.90	0	1.23	0.96	0.89	0.24	1	1	0.52	1	1	5.81	1	1	-1.64	0.99	-3.01	0.86
	T	51	5.94	0.01	0	1.22	0.97	0.90	0.19	0.95	1	0.48	1	1	2.29	1	1	-3.79	0.78	-5.25	0.64



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología anterior se ha aplicado a cinco catedrales andaluzas: la de Cádiz, la Catedral-Mezquita de Córdoba, la de Granada, la de Jaén y la de Málaga, (Figura 1). Las medidas se han realizado siguiendo un protocolo común, escogiendo las posiciones dentro de los recintos donde suele ubicarse la fuente natural en directo de naturaleza musical, hablada o cantada [18]. Los valores promedio de los parámetros acústicos correspondientes a cada posición de la fuente sonora, el número de receptores afectado para cada una de ellas, y los índices parciales calculados de los parámetros acústicos para cada catedral se muestran en la Tabla 3.

De acuerdo con la formulación propuesta, la Figura 4 muestra los resultados de los índices sintéticos calculados para cada posición de la fuente sonora en cada catedral y los valores globales considerando el valor medio de todos los receptores en cada espacio. Para su comparación se incluyen también los resultados de los índices de Berardi.

Un análisis de los datos revela que en ninguna catedral se presenta alguna posición de la fuente problemática ni para la música ni la palabra, y que las posiciones más favorables para la *música* son el trascoro (F4) de la Catedral de Cádiz, todas las posiciones de la fuente sonora en la Catedral-Mezquita de Córdoba que se sitúan en el intervalo 0.8-1.0, siendo la mejor de todas ellas la posición F3 en el púlpito, la posición F5 de la Catedral de Jaén, que corresponde al trascoro, y asimismo la posición F5 de la de Málaga también en el trascoro. Los valores de los índices sintéticos de la *palabra* se sitúan en un valor medio en torno a 0.6, coincidente con el índice para la música en la mayoría de las posiciones de la fuente sonora de todas las catedrales, siendo los más altos el correspondiente al púlpito de la Catedral-Mezquita de Córdoba, y a los trascoros de las catedrales de Jaén y Málaga. En la valoración global destaca lógicamente la Catedral-Mezquita de Córdoba frente a las otras catedrales.

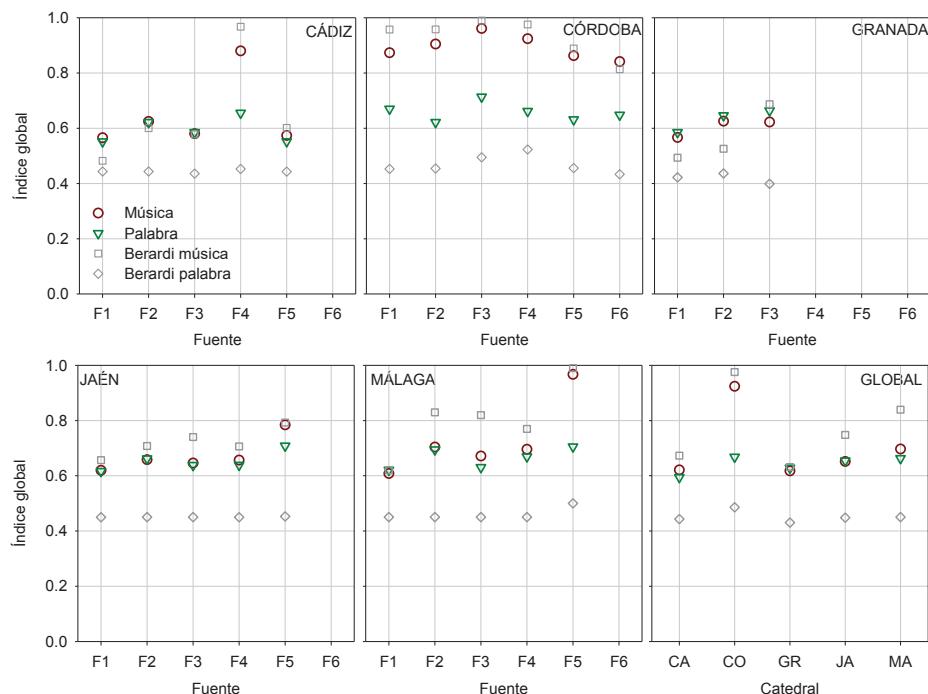


Figura 4. Índices sintéticos globales para la música y la palabra en cada catedral según su posición de fuente sonora y en la última representación gráfica considerando todas las fuentes en cada catedral. Se incluyen también los resultados de los índices de Berardi.



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

En cuanto a la comparación con los índices propuestos por Berardi, observamos que existe muy buena concordancia en relación al índice sintético de la música en las dos propuestas de evaluación, para los índices sintéticos de la palabra la propuesta de Berardi ofrece índices más pequeños, que apenas distingue entre las distintas fuentes sonoras y cuyo valor oscila en torno a 0.4-0.5 en todas las catedrales y para todas las fuentes sonoras. Lo mismo cabe decir cuando se analizan los resultados globales en las catedrales. El origen de las divergencias puede situarse, más que en la supresión del parámetro acústico T_s y el cambio de rangos óptimos de algunos parámetros, en que en el trabajo de Berardi existen incertidumbres y ambigüedades en cómo se calcula el índice de acuerdo a la ecuación aportada, al rango óptimo del parámetro C_{50} que es 0 dB y aparece en un denominador etc., lo que lleva a los autores de este trabajo a no tener seguridad de que se hayan calculado adecuadamente estos índices sintéticos para la palabra.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo pretende sintetizar la acústica de grandes espacios de culto a través de una comparación de los valores medios de seis parámetros acústicos ortogonales, que evalúan cinco características acústicas de los espacios, promediados en los receptores que afectan a cada posición de la fuente sonora de la catedral con sus valores óptimos. Los valores óptimos se han basado en trabajos al respecto de la literatura científica.

Los resultados destacan a la Catedral-Mezquita de Córdoba como un espacio idóneo para la audición de la música en las seis posiciones de la fuente sonora estudiadas y también para la palabra y el canto a pesar de su gran volumen, pero con tiempos de reverberación más cortos y valores más próximos al óptimo del resto de los parámetros de energía, tiempo y lateralidad que el resto de los espacios catedralicios estudiados. El estudio también destaca el espacio del trascoro en las catedrales de las que disponen de él como un lugar adecuado para la realización de conciertos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su más sincero agradecimiento a los deanes de las catedrales por facilitar el acceso para la realización de las medidas. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y por los proyectos concedidos por el Ministerio de Economía y Competitividad con referencias CEI 2014/731 y BIA2014-56755-P.

REFERENCIAS

- [1] E. Cirillo, F. Martellotta. "Worship, acoustics and architecture", Multi-Science Publishing, Essex, UK (2006).
- [2] A. P .O. Carvalho, A. E. J. Morgado, L. Henrique. "Relationship between subjective and objective acoustical measures in churches". Build. Acoust. 4, 1–20 (1997).
- [3] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro. "Acoustics in churches", en Computational Acoustics in Architecture, J.J. Sendra [Ed.], Computational Mechanics Publications, Southampton, 133–177 (1999).
- [4] Y. Soeta, K. Ito, R. Shimokura, S. Sato, T. Ohsawa, Y. Ando. "Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches". J. Acoust. Soc. Am. 131(2), 1206–20 (2012).
- [5] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).
- [6] Y. Ando. "Architectural acoustics: blending, sound sources, sound fields, and listeners". Springer, New York, (1998).
- [7] L. L. Beranek. "Concert and opera halls: how they sound". Acoustical Society of America, Nueva York, (1996).
- [8] T. Zamarreño, S. Girón M. Galindo. "Acoustic energy relations in Mudéjar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. 121, 234–250 (2007).
- [9] F. Martellotta. "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". J. Acoust. Soc. Am. 128, 654–663 (2010).
- [10] K. Kosala. "A single number index to assess selected acoustic parameters in churches with redundant information". Arch. Acoust. 36, 545–560 (2011).
- [11] U. Berardi. "A double synthetic index to evaluate the acoustics of churches". Arch. Acoust. 37(4), 521–528 (2012).



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

- [12] F. Martellotta. "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches". J. Sound Vib. 317, 378-399 (2008).
- [13] L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo. "A methodology for the study of the acoustic environment of catholic cathedrals: application to the cathedral of Malaga". Build. Environ. 72, 102-115 (2014).
- [14] M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño. "Correlations of the acoustic fields of Mudéjar-Gothic churches". Build. Acoust. 15, 175-196 (2008).
- [15] L. G. Marshall. "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio". J. Acoust. Soc. Am. 96, 2251-2261 (1994).
- [16] K. Kosala, Z. W. Engel. "Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach". Appl. Acoust. 74(10), 1144-1152 (2013).
- [17] T. Okano, L. L. Beranek, T. Hidaka. "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls". J. Acoust. Soc. Am. 104, 255-265 (1998).
- [18] L. Álvarez-Morales, M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño. "La acústica de las catedrales andaluzas". Proceedings of Tecniacustica 2013, Valladolid pp. 901-908.

APÉNDICE

Índice parcial, i_j , de cada parámetro, j , para la valoración de la música y de la palabra hablada o cantada.			
MÚSICA		PALABRA	
$0 \leq EDT \leq 1.3$	$i_{EDT} = 0$	$0 \leq EDT \leq 0.48$	$i_{EDT} = 0$
$1.3 < EDT < 2.0$	$i_{EDT} = (EDT - 1.3)/0.7$	$0.48 < EDT < 0.76$	$i_{EDT} = (EDT - 0.48)/0.28$
$2.0 \leq EDT \leq 4.4$	$i_{EDT} = 1$	$0.76 \leq EDT \leq 1.05$	$i_{EDT} = 1$
$4.4 < EDT < 5.95$	$i_{EDT} = (-EDT + 5.95)/1.55$	$1.05 < EDT < 1.4$	$i_{EDT} = (-EDT + 1.4)/0.35$
$5.95 \leq EDT < \infty$	$i_{EDT} = 0$	$1.4 \leq EDT < \infty$	$i_{EDT} = 0$
$0 \leq BR \leq 0.3$	$i_{BR} = 0$	$0 \leq BR \leq 0.25$	$i_{BR} = 0$
$0.3 < BR < 1.0$	$i_{BR} = (BR - 0.3)/0.7$	$0.25 < BR < 0.95$	$i_{BR} = (BR - 0.25)/0.7$
$1.0 \leq BR \leq 1.2$	$i_{BR} = 1$	$0.95 \leq BR \leq 1.15$	$i_{BR} = 1$
$1.2 < BR < 1.9$	$i_{BR} = (-BR + 1.9)/0.7$	$1.15 < BR < 1.85$	$i_{BR} = (-BR + 1.85)/0.7$
$1.9 \leq BR < \infty$	$i_{BR} = 0$	$1.85 \leq BR < \infty$	$i_{BR} = 0$
$0 \leq J_{LF} < 0.20$	$i_{JLF} = J_{LF}/0.20$	$0 \leq J_{LF} < 0.15$	$i_{JLF} = J_{LF}/0.15$
$0.20 \leq J_{LF} \leq 1$	$i_{JLF} = 1$	$0.15 \leq J_{LF} \leq 1$	$i_{JLF} = 1$
$0 \leq IACC_E < 0.275$	$i_{IACC_E} = IACC_E/0.275$	$0 \leq IACC_E < 0.275$	$i_{IACC_E} = IACC_E/0.275$
$0.275 \leq IACC_E \leq 1$	$i_{IACC_E} = 1$	$0.275 \leq IACC_E \leq 1$	$i_{IACC_E} = 1$
$-\infty < G \leq -5$	$i_G = 0$	$-\infty < G \leq -8$	$i_G = 0$
$-5 < G < 2$	$i_G = (G + 5)/7$	$-8 \leq G \leq -1$	$i_G = (G + 8)/7$
$2 \leq G < \infty$	$i_G = 1$	$-1 < G < \infty$	$i_G = 1$
$-\infty < C_{80} \leq -12$	$i_{C80} = 0;$	$-\infty < C_{50} \leq -12$	$i_{C50} = 0;$
$-12 < C_{80} < -1.5$	$i_{C80} = (C_{80} + 12)/10.5$	$-12 < C_{50} < -1.5$	$i_{C50} = (C_{50} + 12)/10.5$
$-1.5 \leq C_{80} < \infty$	$i_{C80} = 1$	$-1.5 \leq C_{50} < \infty$	$i_{C50} = 1$

