

CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA INTERRELACIÓN ENTRE FORMATOS AMBISONICS Y LA NORMA ISO-3382: APLICACIÓN EN LA ACÚSTICA DE RECINTOS HISTÓRICOS SINGULARES

José Benjamín González Gomis^{1*}
Samuel Quintana Gómez²

¹Universidad de Valladolid
²Escuela Politécnica de Cuenca - UCLM

RESUMEN

Los formatos de grabación de audio Ambisonics y la norma ISO-3382 son dos de los grandes estándares de la gestión de la espacialidad del sonido y de la caracterización acústica de recintos. Si la norma ISO-3382 permite cuantificar y comparar esta caracterización, la tecnología Ambisonics logra simular la esfericidad del sonido y convertirla en un parámetro moldeable de la señal de audio. La investigación plantea una experimentación metodológica e instrumental buscando interrelacionar el formato de grabación de tercer orden de Ambisonics con los parámetros contenidos en ISO-3382. Para ello se ha diseñado una metodología de medición que permite una comparación cuantitativa en aspectos subjetivos como la reverberación percibida, el ancho aparente o la envolvente del oyente y la escucha binaural, aplicándose distintas codificaciones de la señal Ambisonics para su interoperabilidad con un mismo programa de análisis acústico. Este método se ha puesto en práctica en la caracterización acústica del recinto histórico de la iglesia de San Pedro (Cuenca), singular por su circularidad. Con ello se pretende tender puentes interdisciplinares entre la acústica y las nuevas tecnologías de audio 360° navegables, contribuyendo a la sensibilización y la transdisciplinariedad de la comprensión del sonido en el espacio y como espacio.

ABSTRACT

The Ambisonics audio recording formats and the ISO-3382 standard are two of the major standards in the management of sound spatiality and the acoustic characterisation of enclosures. While the ISO-3382 standard makes it possible to quantify and compare this characterisation, the Ambisonics technology is able to simulate the sphericity of sound and convert it into a mouldable parameter of the audio signal. The research proposes a methodological and instrumental experimentation seeking to interrelate the Ambisonics third-order recording format with the parameters contained in ISO-3382. To this end, a measurement methodology has been designed that allows a quantitative comparison in subjective aspects such as perceived reverberation, apparent width or the listener's envelope and binaural listening, applying different encodings of the Ambisonics signal for its interoperability with the same acoustic

analysis programme. This method has been put into practice in the acoustic characterisation of the historic site of the church of San Pedro (Cuenca), which is unique for its circularity. The aim is to build interdisciplinary bridges between acoustics and the new navigable 360° audio technologies, contributing to the awareness and transdisciplinarity of the understanding of sound in space and as space.

Palabras Clave— acústica arquitectónica; acústica de iglesias; espacialización del sonido; formatos de grabación Ambisonics; percepción espacial del sonido.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación nace con ánimo de complementar y actualizar estudios de caracterización acústica en la iglesia de San Pedro, y aportar información cuantitativa sobre la espacialidad del sonido en un recinto con una disposición geométrica singular, caracterizada por su circularidad interna y cúpula [1].

Este estudio se basa en investigaciones y mediciones desarrolladas previamente en el ámbito de la caracterización acústica de recintos, rama de la acústica que no ha dejado de crecer en las últimas décadas. Son muchos los tipos de recintos estudiados, y en función de su tipología se adopta para su estudio alguna de las opciones de la norma ISO-3382 (salas de espectáculos, recintos ordinarios, espacios abiertos) [2]. Los recintos históricos, no cuentan con una estipulación propia dentro de la normativa, sin embargo, son fácilmente adaptables a alguna de las tres, especialmente la dedicada a recintos para espectáculos [3]. Esta forma de aproximarse al patrimonio inmaterial a través de la acústica ha experimentado un gran auge en las últimas décadas. Las tipologías arquitectónicas estudiadas son cada vez más amplias, sin embargo, la acústica de iglesias y otros templos sigue siendo uno de los temas más abordados [4]. En España tres centros se han dedicado con asiduidad a estos estudios: la Universidad Complutense de Madrid, con A. Pedrero a la cabeza [5]; la Universidad de Sevilla, centrada especialmente en las iglesias mudéjares y catedrales andaluzas [6]–[8]; y la Universidad Politécnica de Valencia [9]. En los últimos años, la Escuela Politécnica de Cuenca (Universidad de Castilla-La Mancha), también ha abordado con éxito estudios en este campo

* Autor de contacto: jbgonzalezgomis@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

[10]. De especial relevancia para esta investigación es la tesis acústica-performativa defendida por Nelia Valverde Gascuña [1].

La tecnología Ambisonics es una vieja conocida de la industria del audio, pero su crecimiento y divulgación entre muchos sectores basados en el procesamiento de señal ha sido lento y costoso. Su historia comienza en los años setenta del s. XX, con la invención del formato Ambisonics de primer orden. La base de los formatos ambisónicos se remonta a la técnica XY patentada en 1930, donde la combinación de dos micrófonos con figuras de ocho rotadas en 90° permitía una grabación próxima a la circularidad [11]. En la actualidad, su desarrollo ha permitido llegar hasta formatos ambisónicos de 25°, logrando una gran simulación de esfericidad que se aplica en VR, realidad aumentada, videojuegos, etc. [12].

La norma ISO-3382 y los formatos ambisónicos son dos de los principales estándares en cuanto a estudio del sonido en el espacio se refiere. En esta investigación se pretende unir ambos mundos a partir del estudio de caso de la iglesia de San Pedro. Tiene pues una importante carga experimental, donde se ha desarrollado un método comparativo específico para interrelacionar ambos estándares. Por ello podemos concretar los objetivos en tres líneas principales:

- Establecer una aproximación de los métodos de medida de la espacialidad, entre sistemas de instrumentación estándar (ISO-3382), y nuevos sistemas de grabación ambisónicos comerciales (Zylia ZM-1).
- Cuantificar para los parámetros de espacialidad IACC y JLF, las diferencias obtenidas mediante un sistema de instrumentación basado en ISO-3382 y el sistema Zylia, y establecer su valor respecto al JND del parámetro.
- Mostrar diferencias entre los parámetros de espacialidad debidas a la posición de la fuente, ubicada según contexto litúrgico o funcional en un recinto singularmente circular.

2. SAN PEDRO DE CUENCA: SU SINGULAR ARQUITECTURA CIRCULAR

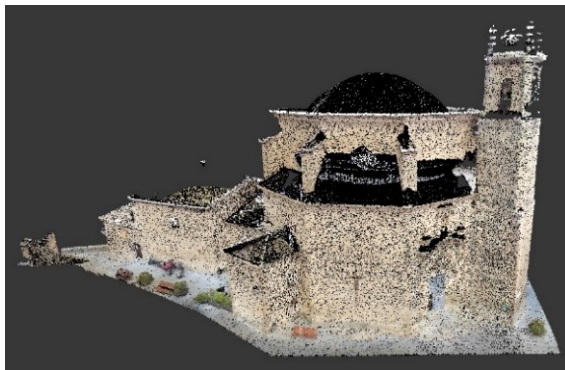


Figura 1. Exterior de la iglesia de San Pedro obtenido a partir de medición de nube de puntos (LiDAR ZEB Horizon©).

Su origen se remonta al s. XII, y ha estado sometida a numerosas restauraciones, especialmente en el s. XVIII, cuando se contó con José Martín de Aldehuela, quien le dio su actual planta: «circular en su interior y octogonal en el exterior» [1]. San Pedro es una iglesia levantada en el casco histórico de Cuenca (Castilla-La Mancha), en la parte más elevada de la ciudad. Fue una de las primeras en ser construidas tras la definitiva reconquista de la ciudad por Alfonso VIII (1177). Unos años después, se creó la sede episcopal en Cuenca

y se reestructuró el espacio urbano con la construcción de nuevas iglesias [1]. San Pedro es uno de los ejemplos de esta estrategia de la edificación sacra por parte del nuevo poder cristiano.

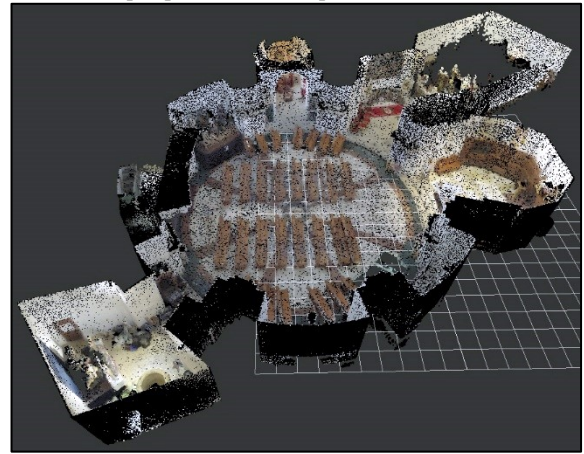


Figura 2. Corte en altura de la iglesia San Pedro.

Los recintos circulares presentan unas características y problemáticas acústicas particulares [13]–[17]. En España estos espacios han sido abordados por autores como Delgado García, Pedrero González o Díaz Sanchidrián, aplicando predicciones acústicas a espacios de significado religioso [18].

3. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPAMIENTO DE MEDIDA



Figura 3. Ejemplo del instrumental de medición en San Pedro.

La metodología de medida se ha establecido en base a la norma ISO-3382, llevándose a cabo dos sesiones de grabación; una sesión en la que se combina el HATS con el sistema comercial Zylia para obtener el parámetro IACC, y una segunda sesión para obtener el parámetro JLF, basada en una configuración pareada de micrófonos (omnidireccional+bidireccional) junto al mencionado sistema comercial Zylia. Se han seleccionado tres puntos de emisión (altar-F1 y central-F2 en planta baja, y coro-F3 en cota +5,40 metros) y 9 puntos receptores distribuidos funcional y estratégicamente en el recinto. Los puntos 1, 3, 5, 7, se encuentran localizados tomando como eje longitudinal la línea que une altar con el coro y a distancias no múltiplos entre ellas; los puntos 2, 4, 6, se sitúan aprovechando la simetría del recinto sobre el área de audiencia del área izquierda de la iglesia (mirando desde el altar), en posiciones que describen

una trayectoria curva desde el interior (zona central) hacia el exterior (zona más próxima a paredes); A1 y C1 corresponden a puntos específicos en las zonas del altar (A1) y capilla (C1) de los Condes de Toreno, con más significación arquitectónica, histórica y patrimonial por haberse construido en una fase previa de la historia de vida del edificio (s. XVI), y conservar su artesanado original [1].

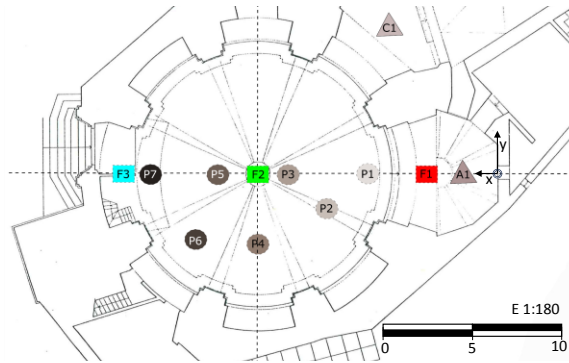


Figura 4. Posiciones de fuentes y receptores seleccionadas.

Tabla 1. Localizaciones de las fuentes y receptores.

Fuente	x (m)	y (m)	z (m)	a F1	a F2	a F3
F1	4,4	0,0	1,5	[-]	9,9	17,4
F2	14,3	0,0	1,5	9,9	[-]	7,4
F3	21,7	0,0	5,4+1,5	17,3	7,4	[-]
A1	1,8	0,0	1,4	2,7	8,1	18,6
C1	5,6	11,0	1,4	9,5	11,3	16,4
P1	7,2	0,0	1,4	2,8	7,1	16,5
P2	10,0	-3,0	1,4	6,0	4,3	11,2
P3	12,8	0,0	1,4	8,34	1,5	8,5
P4	14,3	-5,0	1,4	11,6	5,4	9,0
P5	16,9	0,0	1,4	12,5	2,5	5,1
P6	17,4	-7,0	1,4	15,2	7,1	7,16
P7	19,9	0,0	1,4	15,6	5,6	5,4

Se ha emitido una señal impulsiva generada por globos de grandes dimensiones (>35cm) que, debido al bajo ruido de fondo, permiten conseguir relaciones S/N por encima de 35dB (63Hz a 8kHz). Para cada posición se han emitido tres señales impulsivas promediando su resultado y trabajado en bandas frecuenciales de octava para expresar el valor del parámetro.

El procesamiento de las señales obtenidas mediante el sistema de instrumentación basado en HATS (IACC) y JLF (combinación pareada de micrófonos omni+bidi), se ha procesado mediante el mismo software comercial Dirac 7. Para obtener los parámetros de espacialidad (IACC y JLF) a través de Dirac de las señales grabadas mediante el sistema comercial Zylia, se han exportado previamente para poder interoperar. De esta forma, para calcular IACC se ha tomado la señal grabada con Zylia en modo binaural, donde el canal L corresponde al canal 1 y el canal R al canal 2.

Para calcular el parámetro JLF, se ha combinado por un lado la señal de los 19 micrófonos integrados en Zylia para obtener una señal omnidireccional aplicada al canal 1, con una configuración bidireccional en el canal 2. Para minimizar el procesamiento de la señal, se ha empleado un *plugin* de libre distribución (*Ambisonics Tool Kit-ATK*) implementado en el programa de edición de audio Reaper [19]. Este *plugin*, especializado en el procesamiento de señal ambisónica, ha permitido convertir la pista multicanal exportada del Zylia Studio

en una señal mono con patrón microfónico omnidireccional. Una vez obtenido el canal mono, se ha combinado en Dirac con la señal bidireccional, generando así una pista de dos canales que cumplen las especificaciones requeridas por el propio Dirac para el cálculo de JLF. En ambos sistemas se ha aplicado un ajuste de la señal (contraste en cámara reverberante y en campo libre) para equiparar la señal de los dos micrófonos (AT-4050 con distinto patrón) y el procesamiento de las señales (Zylia ZM-1).



Figura 5. Medición en la capilla de los Condes de Toreno (A1).

4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS Y VALORES PROMEDIO

En la Tabla 2 se muestran los valores típicos de parámetros de caracterización promediados en frecuencia de número único obtenidos a través de las señales recogidas por el HATS de las 9 posiciones (incluidas A1 y C1), que sirven de referencia y base para conocer el comportamiento acústico comparativo de la iglesia. Los valores reflejados incluyen además los promedios de las franjas espectrales normativas. 500-1000 Hz para reverberación y claridad y 125-1000 Hz para ASW y LEV.

Tabla 2. Magnitudes analizadas y sus valores promedio.

Aspecto subjetivo	Magnitud	JND	Fuentes			Rango típico
			F1	F2	F3	
Reverb.	EDT ₁ (s)	5%	5,41	5,64	5,63	1,0 – 3,0
	T ₃₀ (s)		5,64	5,64	5,64	
Claridad	C ₈₀ (dB)	1 dB	-6,3	-4,7	-7,2	-5; +5
	C ₅₀ (dB)		-8,8	-6,1	-9,2	
	D ₅₀	0,05	0,16	0,24	0,11	0,3; 0,7
	T ₅₀ (ms)	10 ms	387	367	414	60; 260
ASW	J _{LIF}	0,05	0,14	0,13	0,20	0,05; 0,35
LEV	IACC _(0,50)	0,075	0,77	0,76	0,66	
	IACC _(0,80)	0,075	0,73	0,72	0,60	
	IACC _(50,+)	0,075	0,49	0,47	0,45	
	IACC _(80,+)	0,075	0,48	0,47	0,46	

La caracterización acústica de la iglesia de San Pedro se ha basado en la normativa ISO-3382, adaptándola mediante la selección de un grupo de parámetros articulados en cuatro grupos de aspectos subjetivos percibidos: reverberación percibida, claridad del sonido, ancho aparente de la fuente (ASW) y envolvente del oyente (LEV). Estos parámetros, mostrados a través de sus valores promedio,

permiten una comprensión acústica rápida del recinto y la comparación directa con auditorios.

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La relación Impulso/Ruido (INR) lograda permite obtener con garantías valores espectrales de los parámetros dentro del rango de las bandas de 125 a 4kHz, pero se han añadido también las octavas de 63Hz y 8kHz para visualizar el comportamiento. La reverberación se caracteriza por sus elevados valores, con una alta difusión del sonido en el recinto, asociado lógicamente a su geometría circular y superficies curvas, con respuesta máxima en la banda de los 250Hz. Los valores para las magnitudes C50 y C80 son crecientes con la frecuencia desde la banda de media frecuencia (250-500Hz), con rangos muy por encima de los considerados óptimos por la normativa (si bien, debe recordarse que no existe una parte específica de la normativa para acústica de iglesias). La claridad vocal (C50) decrece progresivamente para F2, F1 y F3; de esta forma los mejores resultados de C50 se obtienen para la posición central (F2) y los peores para la posición de fuente en el coro (F3). La definición (D50), se caracteriza por unos resultados donde F2 obtiene los mejores resultados, seguida de F1 y F3. En cualquier caso, los valores son muy bajos (por debajo de 0,5) para todo el rango frecuencial, dictaminando una baja definición que derivará en una inteligibilidad pobre. En cuanto al tiempo central (Ts), los valores son muy superiores a los recomendados para auditorios y con tendencias similares para las tres posiciones de fuente. En este caso F1 y F2 son las que proporcionan los valores y tendencias más bajos.

Los aspectos subjetivos de espacialidad percibida tienen un especial interés para este estudio, dado que son los que permiten una mayor interrelación entre instrumentales al ser el objeto principal de los formatos ambisónicos. La espacialidad es una sensación subjetiva presente en el sonido por el propio comportamiento del sonido en el oyente. ASW y LEV son los principales aspectos con los que se puede estudiar la espacialidad [20]. A través de este aspecto subjetivo se puede percibir «[...] que el sonido llega desde varias direcciones diferentes en contraste con una impresión de todo el sonido alcanzando al auditor a través de una apertura estrecha» [21]. Los dos parámetros que afectan a la sensación de espacialidad son el ancho aparente de la fuente (ASW) y la envolvente del oyente (LEV) [22].

El aspecto subjetivo de LEV ha sido abordado mediante el análisis de cuatro ventanas temporales distintas: (0,50); (0,80); (50,+); (80,+). Las ventanas de integración utilizadas para valorar las reflexiones tempranas IACC (0,50) e IACC (0,80) son las más útiles para encontrar cambios en la espacialidad [23], [24]; en este caso las ventanas de integración relacionadas con el sonido reverberante nos permiten observar claramente diferencias posicionales de fuente o receptor (como demuestran comparativamente las figuras 6 y 7.

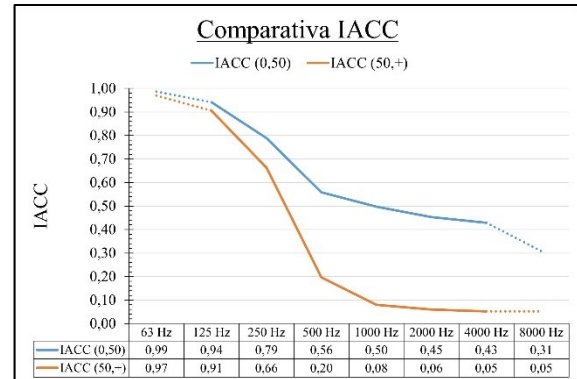


Figura 6. Comparativa de dos ventanas temporales de IACC.

Si individualizamos por fuentes, y como se observa en la figura 9, F3 es la que significativamente produce una mayor sensación de impresión espacial, diferenciándose claramente de las posiciones F1 y F2, principalmente a partir de la banda de 250Hz. Las mayores diferencias se producen en la zona de alta frecuencia (1-4kHz), lo que puede llevar a pensar en una menor difusión del sonido desde F3, provocada tanto por la posición elevada respecto al área de audiencia como por una menor eficiencia de superficies y geometrías de pequeñas dimensiones (>50cm) desde esta posición. Por el contrario, a través de IACC (0,50) no se aprecian diferencias de espacialidad provocadas por cambios posicionales entre F1 (altar) y F2(central), provocando éstas un sonido más monoaural que F3(coro). Esto puede resultar óptimo para reforzar la idea de que la posición elevada del coro, provocaría en los oyentes una mayor sensación de espacialidad, que podría combinarse con la liturgia, bien musical o vocalmente [25].

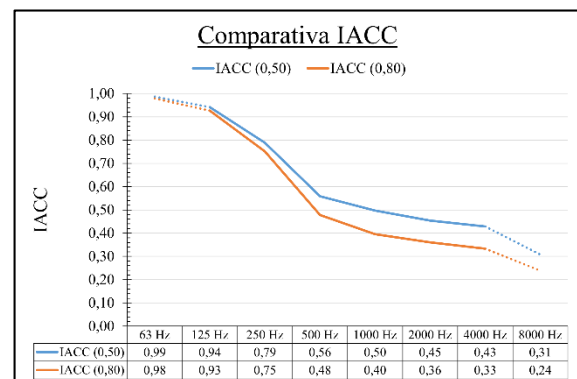


Figura 7. Comparativa entre IACC (0,50) y (0,80) para el promedio general de las tres fuentes.

Si utilizamos una ventana temporal mayor IACC (0,80) se aprecia el mismo efecto sobre la espacialidad que con IACC (0,50), de forma que F3, es la que provoca una mayor sensación de espacialidad. Aunque las tendencias son similares en ambos, la ventana (0,80) provoca en la zona de media y alta frecuencia (>500Hz) valores menores para IACC (0,80) que para IACC (0,50), lo que podría reforzar la hipótesis de que se obtendría una mayor sensación de espacialidad para música que para voz/canto.

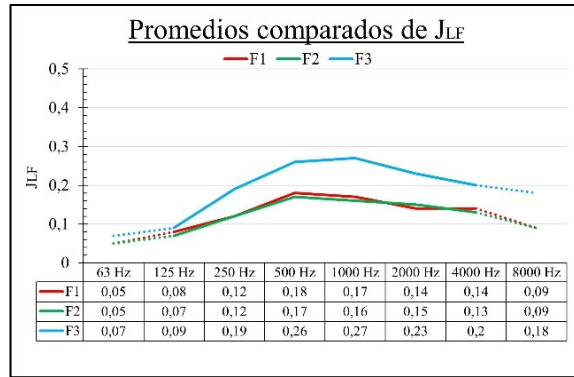


Figura 8. Promedios comparados de JLF para F1, F2 y F3.

Los resultados arrojados a través de la magnitud de fracción de energía lateral precoz (JLF), confirman que F3 provoca una mayor sensación de envolvente en el oyente, que percibe subjetivamente un mayor ancho aparente de fuente sonora marcadamente a partir de media frecuencia (500-1kHz). Las posiciones de fuente F1 y F3 no provocan en promedio diferencias sustanciales. Curiosamente, si tenemos en cuenta la geometría circular del recinto y la gran densidad de superficies curvas, los valores de JLF, están por debajo del rango típico para auditorios (0,3 a 0,7), lo que se podría asociar a una pérdida de localización y dirección principal del sonido en el oyente fruto de la circularidad geométrica del recinto.

Los resultados anteriores están basados en el análisis promedio de las posiciones de fuente sonora, pero si realizamos un análisis pormenorizado entre las posiciones de emisión y recepción, podemos obtener características singulares del recinto, asociadas a su geometría y/o combinación posicional fuente-receptor.

El parámetro IACC (0,50) es el que nos ha dado mejores resultados para encontrar diferencias posicionales. En él se aprecia claramente que, para cualquiera de las posiciones de fuente, el punto P6 (próximo a una capilla a través de la que se accede a la torre y donde se encuentra la pila bautismal), tiene un menor valor sobre el resto y especialmente para la banda de frecuencia de 500Hz, donde se produciría un aumento de la espacialidad (sonido poco monofónico/deslocalizado). Este efecto se aprecia más claramente cuando la fuente está en F1 y F2 (figura 9).

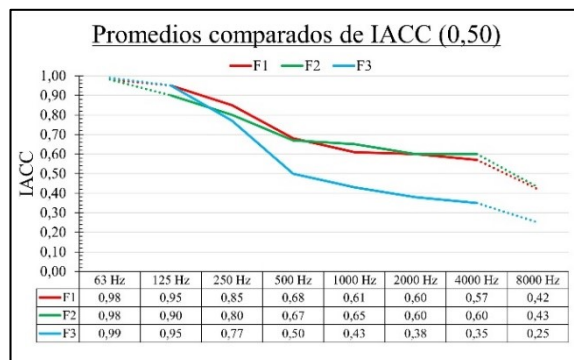


Figura 9. Promedios comparados de IACC (0,50) para F1, F2 y F3.

Asimismo, se observa una clara diferencia entre los puntos impares, ubicados a lo largo del eje longitudinal “altar-coro” (1, 3, 5, 7), con un mayor coeficiente (menor espacialidad), respecto a los puntos pares (2, 4, 6), con un menor valor (mayor espacialidad),

localizados fuera del eje y siguiendo una línea curva hacia el exterior. Es decir, los puntos receptores fuera de una amplia franja central del eje altar-coro tendrían una menor sensación de espacialidad que los próximos al perímetro de la geometría circular de la iglesia y próximos a las superficies y accesos a las capillas laterales. Este efecto es más presente para F1 y F2 situados prácticamente a la misma altura de los puntos receptores.

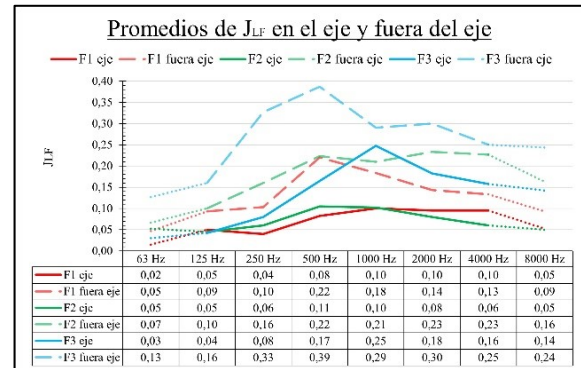


Figura 10. Promedios comparados de JLF en el eje y fuera del eje para F1, F2 y F3.

Respecto a los puntos especiales ubicados dentro del altar o de la capilla de los Condes de Toreno, tanto a través de IACC como JLF, se observan los mismos efectos, produciéndose en ellos una mayor sensación de espacialidad que para el resto de las posiciones. Esto puede explicarse por una menor incidencia de la cúpula central sobre estos puntos, alejados del perímetro circular principal y donde se produce un acoplamiento acústico entre el volumen principal y el secundario de la capilla o altar. Ese hecho se ve reforzado en los resultados que se aprecian en la combinación F2-C1, donde la posición central de F2 produce visión directa del receptor sobre la C1 (es la combinación que tiene menor espacialidad).

Una vez realizada la caracterización general de San Pedro, con especial atención a los aspectos espaciales subjetivos, se ha procedido a la comparación contrastada con el sistema Zylia. Para ello se ha trabajado especialmente con las ventanas temporales de IACC más relevantes para este caso: (0,50) y (0,80).

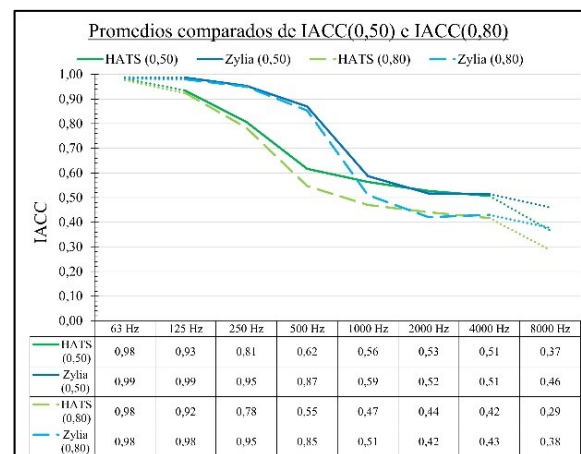


Figura 11. Promedios comparados de IACC (0,50) e IACC (0,80) en ambos sistemas.

En la figura 11 puede apreciarse como el sistema Zylia ZM-1 ofrece unos valores próximos a los obtenidos mediante el sistema HATS. Si bien los valores no coinciden plenamente, el comportamiento de las gráficas es bastante similar, especialmente en baja frecuencia, donde la tendencia de ambas gráficas se mantiene dentro de los valores de la JND, presentando en cambio una diferencia más notable en media y alta frecuencia a partir de los 500Hz derivada probablemente de la propia antropometría del sistema HATS. Ambos sistemas muestran una caracterización del recinto acorde al comportamiento habitual de este parámetro, con una mayor sensación envolvente en bajas frecuencias que desciende paulatinamente hacia una percepción más localizada a medida que aumenta la frecuencia.

La misma comparación aplicada a JLF ofrece un resultado con algunas características comunes al anterior parámetro, con una mayor proximidad en altas frecuencias y unos valores fuera del rango de JND principalmente en media frecuencias (125Hz a 1kHz). Más allá de los valores cuantificados, sin duda influidos por el diferente diseño instrumental y necesidad de un *plugin* (ATK) aplicado para su interoperabilidad, resulta interesante constatar cómo ambos sistemas ofrecen una caracterización de San Pedro para JLF que rompe con el comportamiento habitual del parámetro (aumenta sus valores con la frecuencia) y resulta más bajo de lo que se podría esperar para un recinto circular en relación con el rango típico. En este caso, su arquitectura circular lleva a establecer un pico para JLF en media frecuencia, que desciende paulatinamente desde los 250-500 Hz hasta los 8000Hz según el sistema de medida.

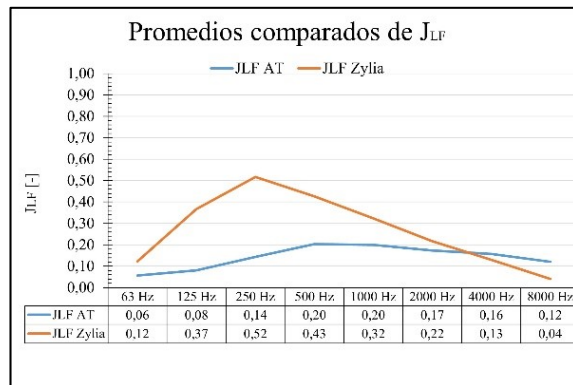


Figura 12. Promedios comparados de JLF con ambos sistemas.

6. CONCLUSIONES

El procedimiento de medida realizado ha permitido caracterizar acústicamente el recinto incidiendo especialmente en los aspectos subjetivos espaciales. Se ha logrado un contraste instrumental que ha permitido estipular unos cauces de interoperabilidad entre la norma ISO-3382 de caracterización acústica y el estándar de grabación ambisónica mediante el sistema comercial Zylia. La cuantificación de los parámetros IACC y JLF ha permitido comprender mejor las diferencias entre ambos sistemas. En el caso de la envolvente del oyente, la equiparación instrumental ha permitido una comprobación del sistema, que, si bien no alcanza los estándares normativos, sí que ofrece una comprensión del comportamiento espacial del recinto que puede ser confiable para la práctica performativa musical. La homologación sistemática total únicamente podría haberse dado en el caso de que todos los valores fuesen menores que la JND correspondiente. En el caso del ancho

aparente de la fuente (ASW), ocurre algo similar. Las tendencias pueden ser equiparables, pero la diferencia de los valores ha resultado mayor, con toda probabilidad por los algoritmos de procesado de señal internos del sistema, y, en menor medida, por la necesidad de aplicar un paso intermedio de procesado de señal para su inclusión en el programa DIRAC; nuevamente podemos hablar de equiparación. En definitiva, el uso del sistema comercial ambisónico Zylia ha resultado efectivo para una comprensión aproximada del comportamiento espacial del sonido, que puede redundar en un amplio diálogo con músicas actuales que valoran especialmente el aspecto espacial (música electroacústica, acusmática, instalación sonora, etc.), dando pie a un uso informado de las características sonoras y espaciales del recinto. Por ello, creemos que puede ser especialmente válido en aquellos contextos sonoros donde para la comprensión acústica del espacio se prioricen las tendencias y los comportamientos en el espectro, frente al cumplimiento de unos valores estipulados normativamente. El empleo del sistema ambisónico en contextos artísticos puede favorecer la sensibilidad a las características espaciales y la adecuación de instrumentistas y ensembles a los distintos recintos en los que realicen sus actividades, aportando información sensible y práctica para la ecualización y los ajustes de la señal procedente del equipo de sonido.

Por otro lado, la selección de tres fuentes de emisión tan distintas como el altar, la posición central de la nave circular, y el coro elevado, ha permitido generar representatividad litúrgica y de los usos sonoros del recinto, y constatar las importantes diferencias de comportamiento en función de la ubicación. Con ello se pone en valor la importancia y lo decisivo que resulta en el resultado final una elección meditada, responsable de los puntos de emisión y recepción en base a las características culturales del edificio histórico analizado.

7. REFERENCIAS

- [1] N. Valverde Gascuña, “Sonidos en la Arquitectura de San Pedro. Un estudio acústico desde la perspectiva técnica y artística de la creación sonora en la Iglesia de San Pedro en Cuenca (España),” Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca, España, 2009.
- [2] I. I. O. for Standardization, *ISO 3382 - Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters*, vol. 1997. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [3] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, and P. Ricciardi, “Guidelines for acoustical measurements in churches,” *Appl. Acoust.*, vol. 70, pp. 378–388, 2009, doi: 10.1016/j.apacoust.2008.04.004.
- [4] S. Girón, L. Álvarez-Morales, and T. Zamarreño, “Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research,” *J. Sound Vib.*, vol. 411, pp. 378–408, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.09.015>.
- [5] A. Pedrero González, “Restauración virtual del patrimonio sonoro. Aplicación al antiguo rito hispánico,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [6] J. J. Sendra Salas and J. Navarro Casas, *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Sevilla, España: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997.

- [7] T. Zamarreño García, S. Girón Borrero, M. Galindo del Pozo, and R. C. Suárez Medina, "La acústica de las catedrales andaluzas: un proyecto I+D interdisciplinar para la recuperación del patrimonio cultural," in *4ª Jornadas Internacional sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo*, Valencia: General de Ediciones de Arquitectura, 2011, pp. 1–16.
- [8] C. L. Álvarez Morales, "Acústica de grandes espacios de culto," Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [9] A. Planells Pérez, "La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx," Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017.
- [10] S. Quintana, M. D. Fernandez, and M. Machimbarrena, "The Circus-Theater of Albacete: Acoustic characterization and analysis of its double stage configuration," *Appl. Acoust.*, vol. 189, p. 108574, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108574.
- [11] F. Zotter and M. Frank, *Ambisonics. A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [12] E. Pfanzagl-Cardone, *The Art and Science of 3D Audio Recording*. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG, 2023.
- [13] M. L. S. Vercammen, "Reflection of sound by concave surfaces," in *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 2010.
- [14] M. L. S. Vercammen, "Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation," *Acta Acust.*, vol. 96, 2010.
- [15] J. H. Rindel, "Attenuation of Sound Reflections from Curved Surfaces," in *Proceedings of 24th Conf. on Acoustics*, 1985, pp. 194–197.
- [16] H. Kuttruff, "Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls," *Acustica*, vol. 77, p. 176, 1993.
- [17] Y. Yamada and T. Hidaka, "Reflection of a spherical wave by acoustically hard, concave cylindrical walls based on the tangential plane approximation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, no. 2, 2005.
- [18] E. M. Delgado García, A. Delgado García, A. Pedrero González, and C. Díaz Sanchidrián, "Estudio acústico de la cripta del hospital de San Juan Bautista de Toledo," in *Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on Underwater Acoustics Applications. European Symposium on Sustainable Building Acoustics - A Coruña, 3 - 6, Octubre, 2017*, 2017, pp. 1241–1248.
- [19] T. Lossius and J. Anderson, "ATK Reaper: The Ambisonic Toolkit as JSFZ plugins," *Ideas Sónicas/Sonic Ideas*, vol. 8, no. 16, pp. 20–31, 2016.
- [20] T. Okano, L. L. Beranek, and T. Hidaka, "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCe), lateral fraction (LFe), and apparent source width (ASW) in concert halls," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 1, pp. 255–265, 1998.
- [21] T. D. Rossing, Ed., *Springer Handbook of Acoustics*. Nueva York, Estados Unidos de América: Springer, 2007.
- [22] S. Girón Borrero, M. Galindo del Pozo, and T. Zamarreño García, "Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches," *J. Sound Vib.*, vol. 315, pp. 1125–1142, 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2008.02.014.
- [23] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.
- [24] Y. Ando, *Auditory and Visual Sensations*. Nueva York: Springer, 2009.
- [25] A. Alonso, R. Suárez, and J. J. Sendra, "Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview," in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics*, 2016, p. 8.