

SIMULACIÓN ACÚSTICA DE UN EVENTO SINGULAR EN UN ENTORNO ABIERTO: EL TRIBUNAL DE LAS AGUAS DE LA HUERTA DE VALENCIA

Elena Díaz¹, Adolfo Pastor¹, Ruben Fraile², Jesús López³, Rafael Fayos¹, Ricardo San Martín⁴, Miguel Galindo⁵, Jaime Segura³, Salvador Cerdá¹, Miguel Arana⁴, Rosa Cibrián⁶, Alicia Giménez¹

¹ Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València
{e-mail: eldaru@alumni.upv.es, apasa3@alumni.uv.es, rafael.fayos@uv.es, salcerjo@gmail.com, agimenez@fis.upv.es}

² Departamento de Ingeniería Telemática y Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid
{e-mail: r.fraile@upm.es}

³ Departamento de Informática, Universitat de València
{e-mail: jesus.lopez-ballester@uv.es, jsegura@uv.es}

⁴ Departamento de Física, Universidad de Navarra.
{e-mail: ricardo.sanmartin@unavarra.es, marana@unavarra.es}

⁵ Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla
{e-mail: mgalindo@us.es}

⁶ Departamento de Fisiología, Universitat de València
{e-mail: rosa.m.cibrian@uv.es}

Resumen

El Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia, declarado Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad en 2009 por la UNESCO, es la más antigua institución de justicia existente en Europa. Cada jueves, bajo la gótica Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia, se juzgan oralmente los pleitos entre los agricultores de las ocho acequias de la huerta valenciana.

Dada la importancia de este evento y con el fin último de promocionar y preservar el Patrimonio Cultural Valenciano, el objetivo de este estudio es realizar la simulación acústica del entorno del Tribunal de las Aguas, utilizando para ello las herramientas proporcionadas por la acústica en recintos. A falta de una normativa específica sobre este tipo de paisaje sonoro, se ha establecido una metodología de actuación basada en la norma UNE-EN ISO 3382-1.

Palabras clave: simulación, acústica, entorno abierto, patrimonio.

Abstract

The Water Tribunal of the Plain of Valencia, named Intangible Cultural Heritage of Humanity in 2009 by UNESCO, is the oldest existing justice institution in Europe. Every Thursday, under the gothic Door of the Apostles of the Cathedral of Valencia, the lawsuits are judged orally among the farmers of the eight dykes of the Valencian orchard.

Given the importance of this event and with the ultimate goal of promoting and preserving the Valencian Cultural Heritage, the objective of this study is to perform the acoustic simulation of the environment of the Tribunal of Waters, using the tools provided by the acoustics in enclosures. In the absence of specific regulations on this type of soundscape, study methodology based on the UNE-EN ISO 3382-1 standard has been established.

Keywords: simulation, acoustics, open environment, heritage.

PACS n°. 43.55.-Ka.

1 Introducción

El Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia, incluido en la lista representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad, es la más antigua institución de justicia existente en Europa. Actualmente, el Tribunal de las Aguas está compuesto por ocho síndicos que representan las ocho acequias de la huerta valenciana, de entre los que se elige al presidente y vicepresidente. Además, durante las sesiones se cuenta con la colaboración de personal no jurisdiccional como son el secretario y el alguacil. Las sesiones del Tribunal tienen lugar, cada jueves, bajo la puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia [1].

Construida a principios del siglo XIV por Nicolás de Ancona, la puerta de los Apóstoles fue el primer añadido a la estructura primitiva de la Catedral de Valencia, cuyas obras comenzaron en 1262 bajo de dirección de Arnau Vidal. De estilo gótico e inspirada en los modelos franceses, la Puerta de los Apóstoles representa una sucesión de esculturas cubiertas por doseles que personifican a los apóstoles. En el tímpano se reproduce la figura de la Virgen rodeada por ángeles y en las arquivoltas se muestran cuarenta y ocho relieves que representan a vírgenes, ángeles y bienaventurados. Coronando la puerta se erige un rosetón de coloridas vidrieras que muestra el trazado de la estrella de David. El conjunto de la puerta destaca por su elaborada y minuciosa decoración, siendo una excelente muestra del gótico tardío del Siglo de Oro Valenciano [2].

Se trata de un paisaje sonoro de gran valor patrimonial donde la transmisión de la palabra es un factor preferente. Así, el objetivo de este estudio es realizar la simulación acústica del entorno del Tribunal de las Aguas, incluyendo la Puerta de los Apóstoles, la plaza de la Virgen y la calle del Miguelete.

2 Metodología

2.1 Toma de datos geométricos

Debido a la singularidad de del entorno, la toma de datos geométricos se ha realizado mediante la técnica de escaneado en 3D. Se han realizado un total de 8 escaneos, los cuales han sido tratados y unidos mediante el software Scene. El resultado final es una nube de puntos del entorno que se ha exportado al software AutoCad para el levantamiento del modelo acústico. Los resultados obtenidos con el escaneo en 3D han sido completados y verificados con mediciones *in situ*. El resto de medidas necesarias de la plaza de la Virgen y de la calle del Miguelete, se han obtenido a partir de su planimetría.



Figura 1 – Escaneado 3D de la Puerta de los Apóstoles

2.2 Toma de datos acústicos

La metodología seguida en la medición acústica se ha basado en los requerimientos de la ISO-3382-1, realizando las adaptaciones necesarias derivadas de la singularidad del entorno a estudiar. En total, se han establecido 9 posiciones de la fuente, correspondientes con la ubicación del alguacil (fuente A) y la ubicación de cada uno de los asientos de los miembros del Tribunal de las Aguas (fuentes B-I); y 6 posiciones de los receptores, 2 ubicados en el interior de la Puerta de los Apóstoles y 4 orientados hacia la Plaza de la Virgen, según se muestra en la Figura 2.

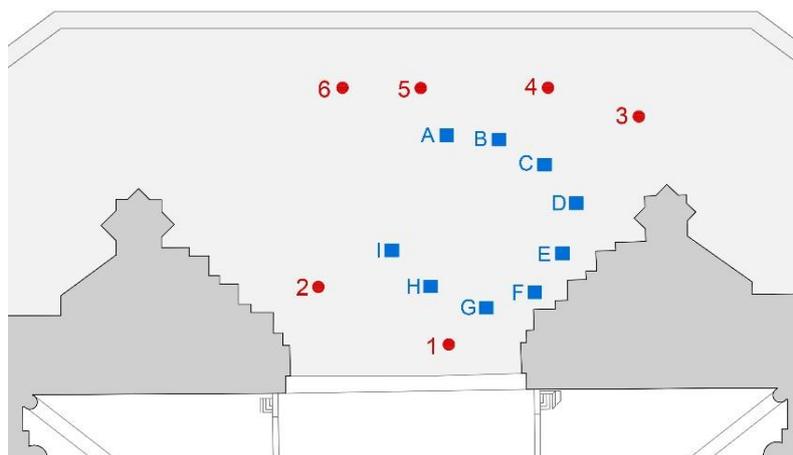


Figura 2 – Ubicación de las fuentes (A-I) y los puntos de medida (1-6)

Para la medición, se han utilizado micrófonos normalizados omnidireccionales y una fuente dodecaédrica omnidireccional. Mediante una señal sweep, se han realizado grabaciones con todos los micrófonos para obtener posteriormente la IR del espacio sonoro. El registro de estos sweeps comparados a partir de la ecuación 1 con el sweep original, permiten obtener la respuesta impulsiva,

$$\text{FFT}(r) = \text{FFT}(sw) * \text{FFT}(IR) \quad (1)$$

donde IR es la respuesta impulsiva, r es la grabación registrada del sweep y sw es el propio sweep.

Para el registro de los sweeps, se han usado 6 micrófonos Behringer B5 con patrón omnidireccional y con cápsula intercambiable (sensibilidad en circuito abierto (a 1KHz) de -40 dBV (0 dBV=1V/Pa), 10 mV/Pa, respuesta en frecuencia lineal entre 20Hz y 20KHz, con 1% THD). Además, se usó una tarjeta de audio multicanal de 8 canales, de la que usamos un canal para emitir el sweep y otros 6 se usaron para registrar el sweep en el entorno. Para la emisión, se usó un sistema de amplificación y emisión que consta de un amplificador de potencia M-1000 (nivel de potencia de salida RL=4Ω bal. 520W+520W) y una fuente dodecaédrica DO12 (Rated power 600W, Sound Power>120dB, Frequency range: 80 Hz-6.3 kHz).

En la Figura 3, se puede observar la disposición de los micrófonos y una de las ubicaciones de la fuente dodecaédrica en la campaña de medidas del Tribunal de las Aguas.

Asimismo, se han realizado mediciones binaurales mediante la colocación de micrófonos en las orejas de dos personas en movimiento durante una de las sesiones del Tribunal de las Aguas, lo que permite la obtención de parámetros binaurales. Los resultados obtenidos posibilitan la realización de futuras investigaciones.



Figura 3 – Campaña de medidas del Tribunal de las Aguas

2.3 Levantamiento y calibración del modelo acústico

Para la simulación acústica se ha empleado un modelo simplificado del entorno del Tribunal de las Aguas, que incluye la Puerta de los Apóstoles, la plaza de la Virgen y la calle del Miguelete.

A partir de los escaneos en 3D y la planimetría, se ha levantado una estructura alambriada del entorno utilizando AutoCad, software que permite trabajar cómodamente tanto con planos como con la nube de puntos generada. Este modelo alambriado se ha exportado al software Sketchup, donde se han generado las superficies del modelo correctamente orientadas y distribuidas por capas según los materiales reales.

Para poder trabajar posteriormente con los software CATT-Acoustic y Odeon, se ha cerrado el modelo con superficies que representan el campo abierto, a las cuales se les ha aplicado material 100% absorbente en el proceso de simulación acústica.

En resultado final es un modelo simplificado compuesto por 516 superficies y con un volumen de 150.865 m³. En las figuras 4 y 5 se muestra una vista general del modelo acústico y una vista en detalle de la Puerta de los Apóstoles. A cada una de las caras del modelo, se les dotará de una características acústicas determinadas (tablas 1 y 2).

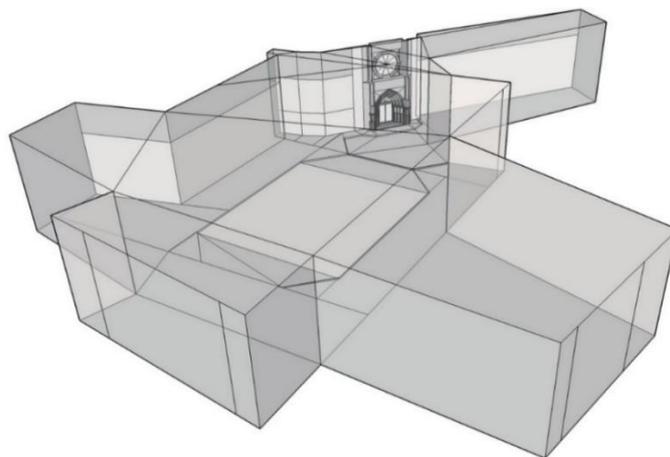


Figura 4 – Modelo acústico. Vista General



Figura 5 – Modelo acústico. Detalle de la Puerta de los Apóstoles

El procedimiento habitual en el calibrado de un modelo acústico de una sala consiste en incluir las absorciones y difusiones de los materiales utilizados de tal manera que el tiempo de reverberación simulado coincida o esté muy próximo al determinado experimentalmente. En numerosos estudios, se ha seguido como procedimiento de calibrado el ajuste del promedio en frecuencias de 500 a 1000 Hz de T30, de tal manera que el promedio experimental y el promedio simulado no se alejen más de 1 JND (5%). Es decir, que a nivel perceptivo no se pueda apreciar diferencia. Este procedimiento se considera adecuado porque el T30 no varía prácticamente en una sala.

En el modelizado del espacio acústico en donde se realiza el Tribunal de las Aguas, se ha observado que un ajuste semejante al que se realiza en una sala cerrada no es adecuado, puesto que existe una mayor variación en parámetros como el T30 y el EDT. En las siguientes gráficas, se puede apreciar la variación de dichos parámetros en la medición realizada con la fuente A (alguacil) en función de la ubicación del receptor.

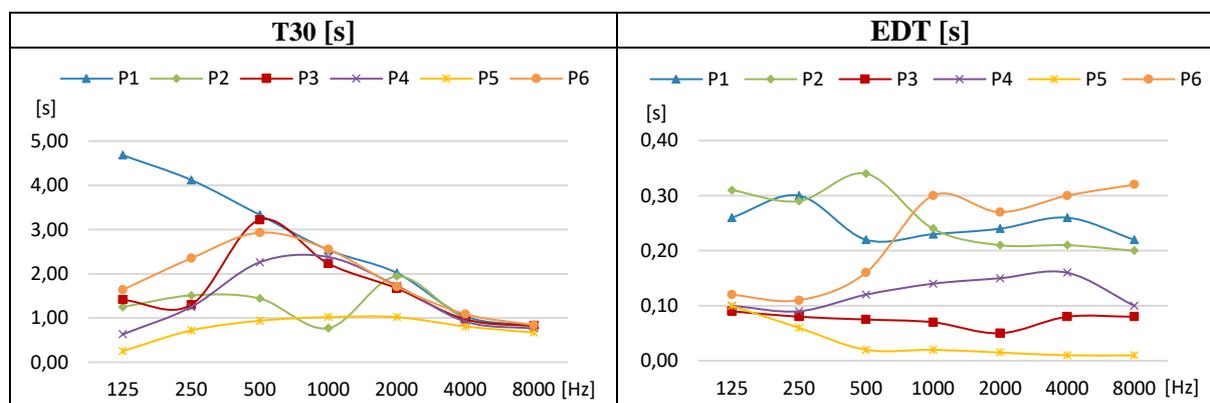


Figura 6 – Variación de T30 y EDT (fuente A)

No obstante, analizando las mediciones se ha observado que en este tipo de entorno los parámetros C80 y C50 presentan una menor variación. En las siguientes gráficas, se muestra la variación de dichos parámetros en la medición realizada con la fuente A (alguacil) en función de la ubicación del receptor.

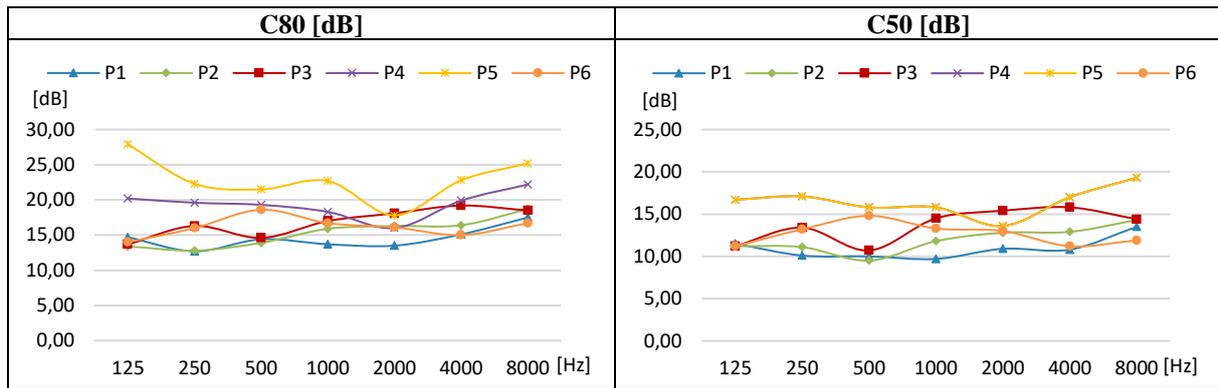


Figura 7 – Variación de C80 y C50 (fuente A)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las mediciones y las características específicas del entorno acústico estudiado, se ha considerado adecuada la calibración del modelo con C80 (claridad musical) y C50 (claridad de la voz), al presentar estos parámetros una mayor estabilidad.

La simulación acústica se ha realizado con dos software diferentes, CATT-Acoustic y Odeon, con el objetivo de estudiar la aplicabilidad de este tipo de herramientas en el estudio de entornos patrimoniales abiertos y semiabiertos.

Para la calibración del modelo acústico, se han establecido los coeficientes de absorción que se indican en la Tabla 1 en función del tipo de material, tomando como referencia los valores obtenidos por Vorländer mediante ensayos normalizados [3]. Como se ha comentado anteriormente, a las superficies que representan el campo abierto se le ha aplicado un material 100% absorbente.

Tabla 1 – Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en la simulación.

Material	Frecuencias en bandas de octava en Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Suelo de mármol¹	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Pared de piedra caliza¹	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05
Puerta de madera sólida¹	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10
Promedio superficie dura¹	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05

¹ Vorländer, 2008

En cuanto a la dispersión de los materiales, en este estudio se han establecido tres niveles en función de la rugosidad de los materiales, según se establece en la Tabla 2. En este entorno, tiene especial importancia el grado de detalle de la decoración de la Puerta de los Apóstoles, lo que incrementa notablemente la dispersión de las superficies en este punto.

Tabla 2 – Dispersión de los materiales utilizados en la simulación.

Material	Dispersión
Liso¹	0.10
Cierto grado de rugosidad¹	0.25
Rugoso¹	0.50

¹ Ajustado durante el proceso de calibración.

Referente a la validación del modelo acústico, la norma establece el umbral diferencial JND para el parámetro C80 en 1dB. No obstante, hay autores que han determinado valores superiores de dicho umbral a partir de estudios experimentales. M. Ahearn y col. establecieron un JND de $1,6\pm 0,3$ dB para el parámetro C80 [4]. R. Höhne y col. situaron el JND para C80 en campos sonoros reales alrededor de los 2.5 dB [5], resultados que fueron confirmados por I.B. Witew mediante la utilización de campos sonoros sintéticos [6]. En cuanto al parámetro C50, la norma no indica un valor concreto del umbral diferencial JND. No obstante, se cuenta con estudios experimentales que han analizado las diferencias mínimas de dicho parámetro para poder ser percibidas por el oído humano. J.S.Bradley y col. estimaron un JND de 1.1 dB, siendo necesario aumentar en aproximadamente 3 dB para crear una mejora fácilmente detectable en situaciones cotidianas [7]. Con todo ello, es importante destacar que hoy en día no existe un consenso definitivo aceptado por toda la comunidad científica. [8]

Tiendo en cuenta las investigaciones analizadas, en este estudio se ha establecido el JND para los parámetros C80 y C50 en 2,5dB.

3 Resultados

A continuación, vamos analizar los resultados obtenidos en las simulaciones acústicas con los software Odeon y CATT-Acoustic en comparación con los resultados experimentales para todos los puntos de medida, prestando especial atención a los resultados obtenidos con la fuente en A (alguacil), dada su especial representatividad en el evento singular estudiado.

3.1 Simulación con Odeon

Teniendo en cuenta la totalidad de los puntos medidos y simulados, para el parámetro C80 encontramos que el 87% de los puntos tiene un JND igual o inferior a la unidad, siendo el valor más desfavorable 1,38. Para el parámetro C50 dicho porcentaje es del 93%, estando todos los valores por debajo de 1,2. En la figura 8 se muestra la dispersión de los valores de JDN para cada una de las fuentes (A-I).

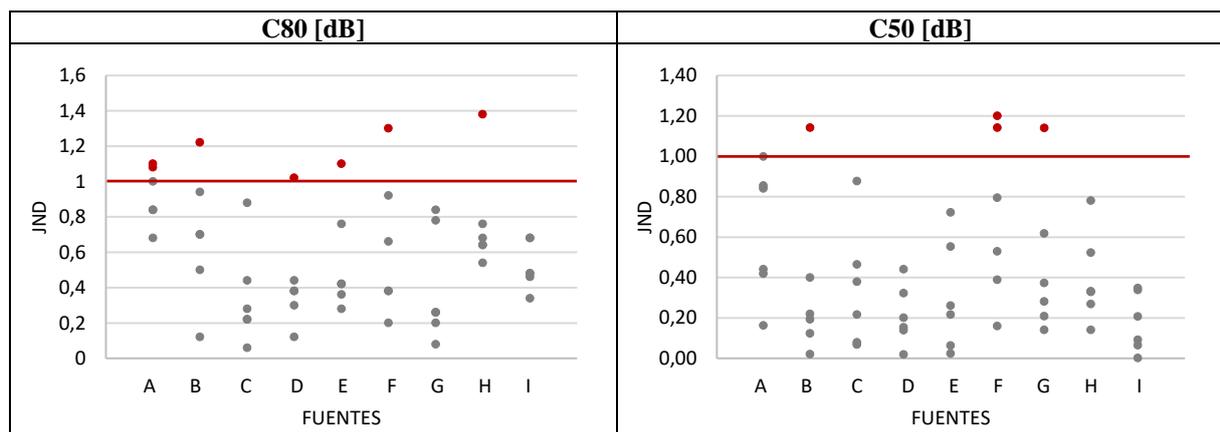


Figura 8 – Dispersión de JND en C80 y C50 (Odeon)

En la Tabla 3 se muestra la comparativa entre el promedio en frecuencias de 500-1000Hz de los valores medidos y simulados con Odeon para los parámetros C80 y C50, con su correspondiente JND, para cada uno de los puntos de medida con la fuente en A (alguacil).

Para el parámetro C80, 4 de los 6 puntos tienen un JND igual o inferior a uno, siendo en el resto de casos valores muy próximos a la unidad (1,08 y 1,10). Para el parámetro C50, todos los puntos tienen un JND igual o inferior a la unidad.

Tabla 3 – Resultados de la simulación con Odeon (fuente A)

	C80 (dB)				C50 (dB)			
	Promedio 500-1000 Hz		Error absoluto	JND	Promedio 500-1000 Hz		Error absoluto	JND
	MEDIDO	ODEON			MEDIDO	CATT		
P1	14,05	16,75	2,7	1,08	9,85	11,95	2,10	0,84
P2	14,90	16,60	1,70	0,68	10,65	12,79	2,14	0,86
P3	15,80	18,55	2,75	1,10	12,60	15,10	2,50	1,00
P4	18,80	20,90	2,10	0,84	15,80	16,90	1,10	0,44
P5	22,10	24,60	2,50	1,00	19,55	19,96	0,41	0,16
P6	18,80	20,90	2,10	0,84	14,05	15,10	1,05	0,42

3.2 Simulación con CATT-Acoustic

Teniendo en cuenta la totalidad de los puntos medidos y simulados, para el parámetro C80 encontramos que el 81% de los puntos tiene un JND igual o inferior a uno, presentándose en este punto el valor más desfavorable (1,47). Para el parámetro C50 dicho porcentaje es del 83%, siendo el valor más desfavorable 1,35. En las figura 9 se muestra la dispersión de los valores de JDN para cada una de las fuentes (A-I).

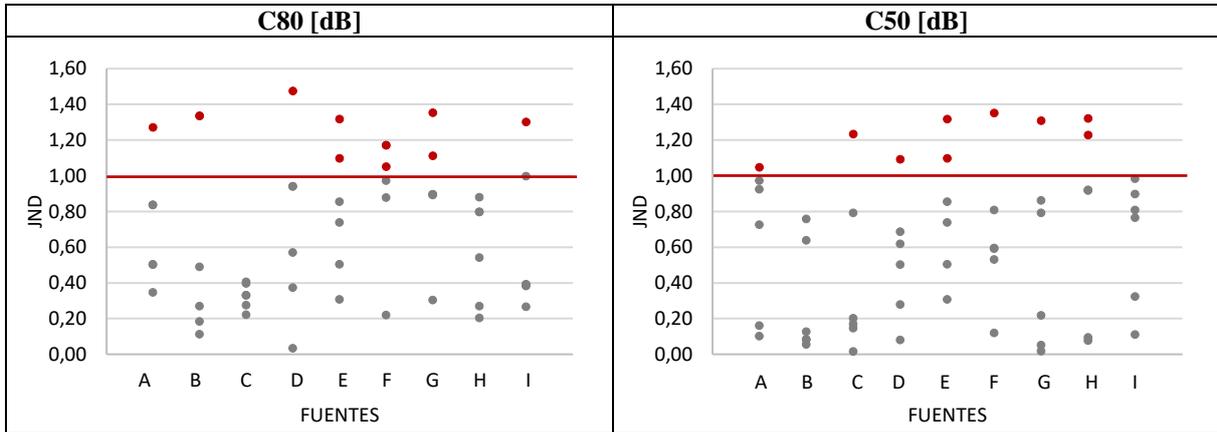


Figura 9 – Dispersión de JND en C80 Y C50 (CATT-Acoustic)

En la Tabla 4 se muestra la comparativa entre el promedio en frecuencias de 500-1000Hz de los valores medidos y simulados con CATT-Acoustic para los parámetros C80 y C50, con su correspondiente JND, para cada uno de los puntos de medida con las fuente en A (alguacil).

En este caso, tanto en el parámetro C80 como en el C50, el 5 de los 6 puntos tienen un JND inferior a uno. Para C80, el punto que supera la unidad tiene un valor de 1,27, mientras que en C50 es muy cercano a la unidad (1,05).

Tabla 4 – Resultados de la simulación con CATT-Acoustic (fuente A)

	C80 (dB)				C50 (dB)			
	Promedio 500-1000 Hz		Error absoluto	JND	Promedio 500-1000 Hz		Error absoluto	JND
	MEDIDO	ODEON			MEDIDO	CATT		
P1	14,05	14,91	0,86	0,34	9,85	12,47	2,62	1,05
P2	14,90	16,16	1,26	0,50	10,65	12,46	1,81	0,72
P3	15,80	17,05	1,25	0,50	12,60	12,21	0,40	0,16
P4	20,25	20,89	0,63	0,25	15,80	18,11	2,31	0,92
P5	22,10	25,28	3,18	1,27	19,55	21,98	2,43	0,97
P6	18,80	20,90	2,10	0,84	14,05	14,30	0,25	0,10

4 Conclusiones

A la vista de los datos obtenidos, se considera válida la calibración realizada del modelo acústico en ambos software, presentado la simulación con Odeon mejores valores de JND. Estos resultados muestran la aplicabilidad de las herramientas y procedimientos utilizados en recintos cerrados para el estudio acústico de entornos patrimoniales abiertos y semiabiertos, siendo necesario realizar ciertas adaptaciones. La obtención del modelo acústico calibrado posibilita la virtualización total del entorno (auralización, recorridos virtuales, fuentes móviles, etc.)

En el caso del entorno del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia, ha resultado conveniente realizar la calibración con los parámetros C80 y C50, dado que en este entorno singular han resultado ser más estables que el tiempo de reverberación. Además, en este entorno acústico, donde la transmisión de la palabra es un factor preferente, resulta especialmente adecuado el estudio de C50, parámetro que permite evaluar la influencia de la acústica del entorno en la claridad e inteligibilidad del habla.

Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos de investigación BIA2012-36896 y BIA2016-76957-C3-3-R. Asimismo, agradecemos a la Catedral de Valencia su colaboración en el proceso de medida.

Referencias

- [1] M. J. Mascarell Navarro, R. Tarín López y D. Salas Giner, *El Tribunal de las Aguas de Valencia*, Valencia: Javier Boronat, 2002.
- [2] A. Núñez Sanmartín, *Análisis, estudio y restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de la repriminación de 1972*, Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [3] M. Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Berlin, 2008.
- [4] M. Ahearn y M. Schaeffler, The Just Noticeable Difference in the Clarity Index for Music, C80, *University of Hartford Acoustics*, 2009.
- [5] R. Höhne y G. Stroth, Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen (La visibilidad de los parámetros de definición y claridad en las salas de conciertos), *Acustica*, nº 81, pp. 309-319, 1995.
- [6] I. B. Witew, Is the perception of listener envelopment in concert halls affected by clarity?, *Fortschritte der Akustik - Proceedings of DAGA'06*, Braunschweig, 2006.
- [7] J. Bradley, R. Reich y S. Norcross, A just noticeable difference in C50 for speech, *Applied Acoustics*, nº 58, pp. 99-108, 1999.
- [8] R. San Martín, K. Lopetegui y M. Arana, Determinación del Just Noticeable Difference (JND) de parámetros acústicos mediante campos sonoros reales, *TecniAcústica*, Cádiz, 2009.