

Acústica 2008
20 - 22 de Outubro , Coimbra, Portugal
Universidade de Coimbra

LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS IGLESIAS PRERROMÁNICAS HISPANAS

César Díaz, Antonio Pedrero, M^a de los Ángeles Navacerrada, Carmen Carro

Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica. Universidad Politécnica de Madrid
cesar.diaz.sanchidrian@upm.es, antonio.pedrero@upm.es

Resumen

Este trabajo muestra los resultados de una campaña de mediciones acústicas realizadas sobre diversas iglesias prerrománicas hispanas. Debido a las reducidas dimensiones de estas iglesias comparadas con las de otros periodos históricos, los resultados obtenidos distan sensiblemente de los valores de otros tipos de iglesia. Los tiempos de reverberación son bajos, sobre todo en las iglesias más pequeñas y se aprecia una cantidad importante de energía inicial. Todo esto hace que la inteligibilidad de la palabra sea muy superior a la obtenida en iglesias de otros estilos arquitectónicos.

Palabras-clave: Acústica de iglesias, parámetros acústicos, inteligibilidad.

Abstract

This work shows the results of a collection of acoustic measurements on several pre-romanesque hispanic churches. Due to the small dimensions of these churches compared with those of other historical periods, the obtained results are very different from the values obtained for other types of church. The values of reverberation time are low, especially in smaller churches and there is a significant amount of initial energy. All this makes that speech intelligibility is much higher than that obtained from churches of other different architectural styles.

Keywords: Church acoustics, acoustical parameters, speech intelligibility.

1 Introducción

Las iglesias prerrománicas hispánicas constituyen un valioso patrimonio artístico- arquitectónico que está siendo objeto en la actualidad de numerosos estudios. Sin embargo, y hasta el momento, no se han investigado las condiciones acústicas de dichas iglesias, cuyas características geométricas y constructivas difieren considerablemente de las de iglesias posteriores. Este trabajo intenta llenar este hueco analizando las características acústicas de cinco de las iglesias prerrománicas hispanas más representativas.

Un estudio como este tiene, además de las propias de cualquier estudio acústico, dos dificultades adicionales a la hora de obtener resultados representativos. La primera estriba en la heterogeneidad estilística propia de la arquitectura religiosa de este periodo histórico. La segunda dificultad es que las

iglesias de esta época han sido objeto de numerosas reformas a lo largo del tiempo, por lo que la acústica actual de estos recintos podría diferir de la que tuvieron en su estado original.

La selección de iglesias empleadas en este trabajo intenta paliar en lo posible ambas dificultades. En cuanto a las iglesias que se podrían considerar visigóticas, se incluyen edificios con las distintas configuraciones que se daban en la época: cruciformes (Santa María de Melque), de planta basilical (San Juan de Baños) y la combinación de ambas (San Pedro de la Nave). También se incluye una de cabecera tripartita (Santa Lucía del Trampal). Como representante de la arquitectura mozárabe se estudia la emblemática iglesia de San Cebrián de Mazote.

2 Las iglesias estudiadas

Las iglesias incluidas en este estudio representan las tipologías más comunes de iglesias prerrománicas de la península ibérica, y están datadas entre los siglos VII y X. En algunos casos, su estado actual dista de su estructura original debido a las reformas que las iglesias han sufrido a lo largo del tiempo. A continuación se exponen brevemente las características de las iglesias objeto de estudio.

La iglesia de San Juan de Baños está situada en la localidad de Baños de Cerrato, provincia de Palencia, y está considerada la iglesia en pie más antigua de España. A diferencia del resto de iglesias estudiadas, su datación está clara gracias a la inscripción que se conserva y que demuestra que fue mandada construir por Recesvinto en el año 661, lo que no deja duda de su naturaleza visigótica. Posee planta basilical de tres naves separadas por arcos de herradura sobre columnas cilíndricas. Las naves culminan en sendos ábsides, de los cuales solamente el central pertenece a la estructura original de la iglesia. Las excavaciones realizadas demuestran que originalmente existía un transepto con dos capillas laterales no continuas con respecto a la capilla central. La cubierta es de madera a dos aguas en la zona de las naves y de piedra en los ábsides, con bóveda de cañón en el central y de crucería en los laterales. Los muros están contruidos con sillares grandes colocados a hueso.

La iglesia de Santa Lucía del Trampal es la de más reciente catalogación y constituye una de las construcciones más originales del prerrománico español. Está situada en la localidad cacereña de Alcuéscar. Los restos de edificios próximos hallados junto a ella parecen indicar que la iglesia pertenecía a un conjunto monástico. A día de hoy su datación no está clara ya que existe controversia entre los que defienden su cronología visigoda y los que la califican como mozárabe, lo cual la ubicaría entre los siglos VII y IX dependiendo de la tesis que asumamos. Su estructura es compleja. Tiene planta basilical de tres naves que se comunica mediante un estrecho coro con un pseudo-crucero en el que se ubican tres capillas, lo que la asemeja a la estructura original de la iglesia de San Juan de Baños anteriormente citada. Anexas a la nave principal existían habitaciones laterales hoy desaparecidas. Los muros son de mampostería de pizarra, mezclados con sillería de granito. Las cubiertas abovedadas originales se han perdido casi en su totalidad y se han sustituido en la restauración realizada recientemente por cubiertas de madera a dos aguas.

La iglesia de San Pedro de la Nave, construida probablemente a finales del siglo VII o principios del VIII, se encuentra situada en la localidad de Campillo, provincia de Zamora. Su ubicación original era a las orillas del río Esla, pero debido a la construcción del embalse de Ricobayo, en 1930 se trasladó piedra a piedra hasta su enclave actual. La característica distintiva de esta iglesia es su planta, que combina un diseño original en forma de cruz griega, común en templos monacales de la época, con una nave de estructura basilical más propia de iglesias de uso público. Los muros están contruidos con sillares a hueso y las cubiertas poseen bóvedas de cañón, algunas de las cuales conservan su estructura pétreo original mientras que otras se han reformado con ladrillo. El crucero se cierra con

una cubierta de madera. Otro de los rasgos destacados de la iglesia es su riqueza ornamental, constituyendo una de las muestras más importantes de escultura visigótica.

La iglesia de Santa María de Melque se encuentra en el término municipal de San Martín de Montalbán, en el norte de la provincia de Toledo. Según las excavaciones arqueológicas realizadas, la iglesia formaba parte de un conjunto monástico del que se han perdido el resto de las construcciones. Dichas excavaciones no han arrojado datos determinantes para la datación de la iglesia si bien la hipótesis más aceptada es la que establece su construcción hacia la mitad del siglo VIII. La iglesia se construye en forma de cruz griega. De las dos naves que la conforman, la dirección Este-Oeste es más larga y está rematada en su parte oriental por un ábside con forma rectangular al exterior y en arco de herradura al interior. Existe además una habitación adosada en la zona noreste. En cuanto al alzado, toda la iglesia está abovedada sobre arcos de herradura. Lo muros se construyen a base de sillares a hueso. En ellos se ha perdido la decoración de estuco de las paredes, del que solo se conserva un pequeño fragmento. En una reciente restauración se ha sobrepuesto un suelo de tarima sobre el suelo de “opus signinum” original.

Como representante de la arquitectura inequívocamente mozárabe, este estudio incluye la iglesia de San Cebrián de Mazote. La iglesia de San Cebrián, o San Cipriano se encuentra en la localidad de San Cebrián de Mazote, a pocos kilómetros de Valladolid. No se conoce la fecha precisa de su construcción, pero la mayoría de los investigadores la sitúan en el siglo X. La planta es de tipo basilical con crucero, con tres naves separadas por arcos de herradura que se apoyan sobre columnas. La cabecera es tripartita, con tres capillas, siendo más grande la central que las laterales. Presenta la particularidad de poseer un ábside trasero o contraábside. Los muros son, en su mayoría de mampostería, recubiertos por estuco en su interior. Las cubiertas son de madera a dos aguas en la nave central y abovedadas en la cabecera y en el ábside trasero.

La figura 1 muestra los planos de planta, en su estado original, de las iglesias estudiadas, mientras que la tabla 1 presenta los parámetros más influyentes en cuanto a su comportamiento acústico.

Tabla 1 – Características principales.

Iglesia	Vol (m ³)	Suelo	Muros	Techo	Mobiliario
San Juan de Baños	928	Piedra	Piedra	Madera	Bancos tapizados
Santa Lucía del Trampal	745	Opus Signinum	Piedra	Madera	Ninguno
San Pedro de la Nave	780	Piedra	Piedra	Piedra/ladrillo	Bancos de madera
Santa María de Melque	1220	Madera	Piedra	Piedra	Ninguno
San Cebrián de Mazote	2700	Piedra	Estuco	Madero	Bancos de madera

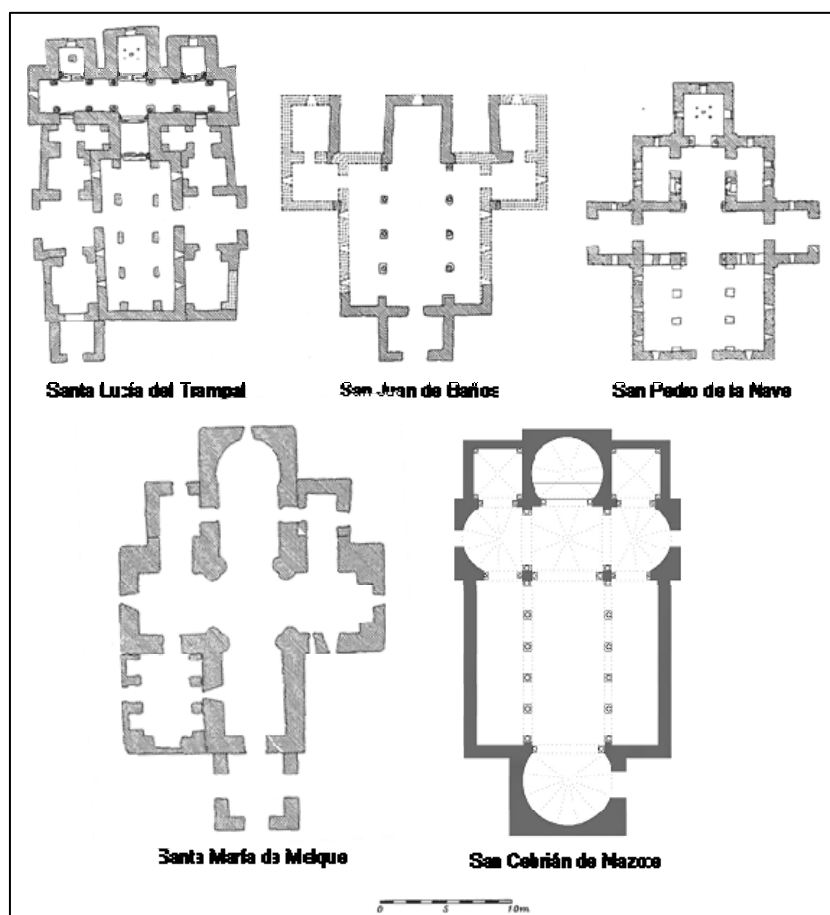


Figura 1 – Planos de planta de las iglesias estudiadas

3 Metodología y equipamiento de medida

Las mediciones y los cálculos subsiguientes se han realizado siguiendo los criterios de la norma UNE-EN ISO 3382:2001[1]. El equipamiento de medida utilizado está basado en el software de acústica de salas DIRAC, comercializado por Bruel & Kjaer. Como fuente sonora se utilizó una fuente omnidireccional Bruel & Kjaer modelo 4296, con un amplificador Bruel & Kjaer modelo 2716. La captación de las señales sonoras se realizó con un micrófono de doble diafragma, marca Neumann, modelo TLM 170 R. El método de medida utilizado es el de barrido exponencial de tonos.

Se han utilizado tres posiciones de la fuente sonora en cada iglesia, de las cuales una de ellas ha sido en la parte frontal del ábside principal, en el eje de la iglesia. Las posiciones de micrófono se han distribuido por toda la superficie útil, procurando que no siguiesen un patrón uniforme. El número de posiciones ha variado en función del tamaño de cada iglesia.

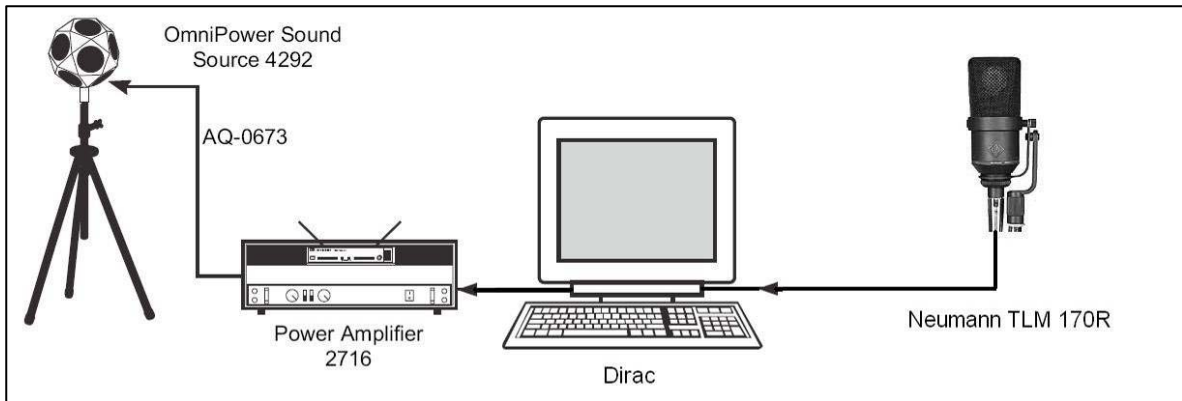


Figura 2 – Equipamiento de medida

4 Resultados obtenidos

4.1 Análisis de los Tiempos de Reverberación

A partir de las respuestas impulsivas obtenidas en la campaña de mediciones se han calculado los tiempos de reverberación de los recintos en bandas de octava. En las tablas y gráficas siguientes se muestran los valores promedio y las desviaciones típicas de los valores del Tiempo de Reverberación T30 de las diferentes iglesias.

Como era de esperar, las dos iglesias de mayor volumen son las que presentan valores mayores de tiempo de reverberación. La dispersión de los datos obtenidos es, en general, pequeña. Las desviaciones estándar son del orden del 10 % de los valores promedio en los casos peores, que son los de las bajas frecuencias.

Tabla 2 – Promedios y desviaciones estándar de los tiempos de reverberación medidos.

Frecuencia, Hz	T30, s									
	S.J. de Baños		S.L. del Trampal		S.P. de la Nave		S.M. de Melque		S.C. de Mazote	
	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.
63	2,28	0,25	1,02	0,12	1,63	0,12	1,97	0,25	3,38	0,34
125	1,92	0,15	0,90	0,13	1,44	0,10	2,28	0,12	3,11	0,22
250	1,66	0,09	0,85	0,07	1,40	0,06	2,18	0,10	3,10	0,12
500	1,39	0,06	0,87	0,08	1,27	0,04	2,21	0,08	2,95	0,18
1000	1,25	0,03	0,86	0,08	1,07	0,03	2,10	0,04	2,63	0,10
2000	1,12	0,03	0,82	0,07	0,94	0,02	1,69	0,04	2,26	0,12
4000	0,96	0,03	0,72	0,11	0,82	0,02	1,30	0,04	1,81	0,14
8000	0,69	0,03	0,51	0,07	0,66	0,03	0,83	0,04	1,18	0,21
T _{mid}	1,31		0,86		1,17		2,15		2,79	

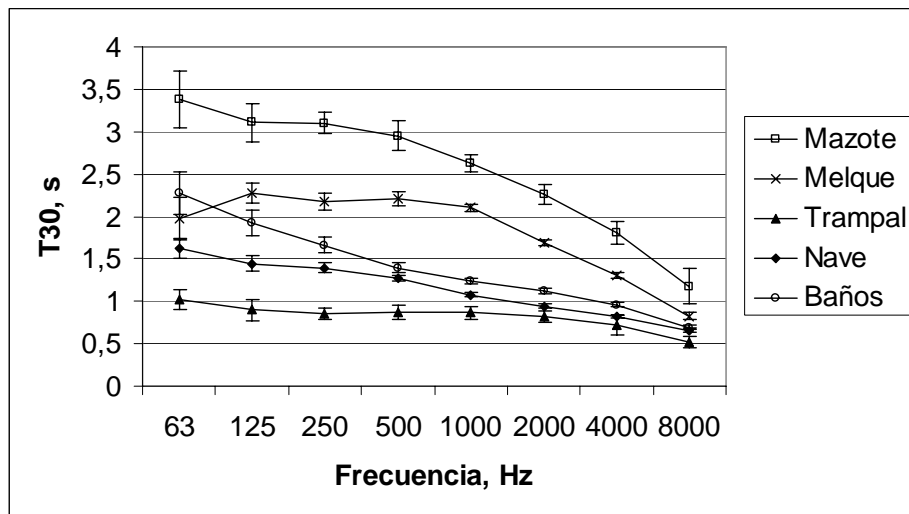


Figura 3 – Promedios y desviaciones estándar de los tiempos de reverberación medidos.

A fin de realizar una valoración de la distribución en frecuencia de la reverberación obtenida en las distintas iglesias, se ha realizado una normalización con respecto al T_{mid} de los valores en cada banda de frecuencia. Los resultados se muestran en la figura 4. Los valores oscilan en la franja determinada por $T_{mid} \pm 0,5$ s, a excepción de la iglesia de san Juan de Baños que presenta una reverberación superior en frecuencias bajas, y las iglesias de santa María de Melque y San Cebrián de Mazote que son las de mayor volumen y presentan una disminución de la reverberación a altas frecuencias debida probablemente a la absorción del aire.

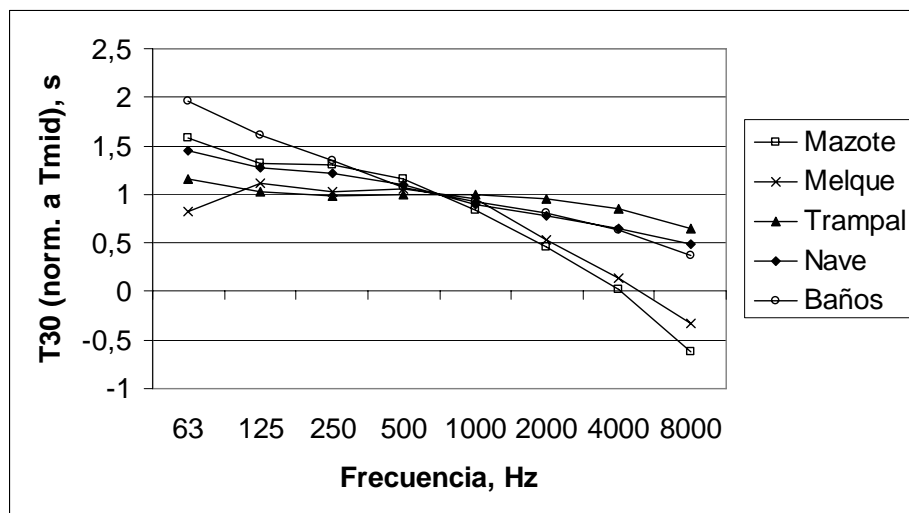


Figura 4 – Comparación de espectros de tiempo de reverberación

Existen diversas relaciones empíricas que ligan el tiempo óptimo de reverberación de un recinto con el volumen del mismo. Una de las más usadas en acústica de iglesias [2] se expresa como:

$$T_{op} = k \cdot u \cdot V^{1/3} \quad (1)$$

donde el coeficiente k depende de la frecuencia y el coeficiente u viene dado por el tipo de señal sonora que se va a producir en el recinto, adoptando un valor de 0,075 para la palabra y valores que oscilan entre 0,08 y 0,10 para la música, dependiendo del tipo de música.

Tabla 3 – Valores del coeficiente k en función de la frecuencia.

Frecuencia, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
<i>k</i>	1,30	1,15	1,0	0,9	0,9	0,9

Se ha comprobado el cumplimiento de los tiempos de reverberación de las iglesias bajo estudio con los criterios anteriormente expuestos, dando como resultado lo expuesto en la figura 5. Como se puede apreciar, a excepción de la iglesia de Santa Lucía del Trampal, cuyos valores de tiempo de reverberación encajan dentro de las tolerancias establecidas para uso musical, el resto de valores obtenidos en las demás iglesias están muy por encima de los valores óptimos calculados.

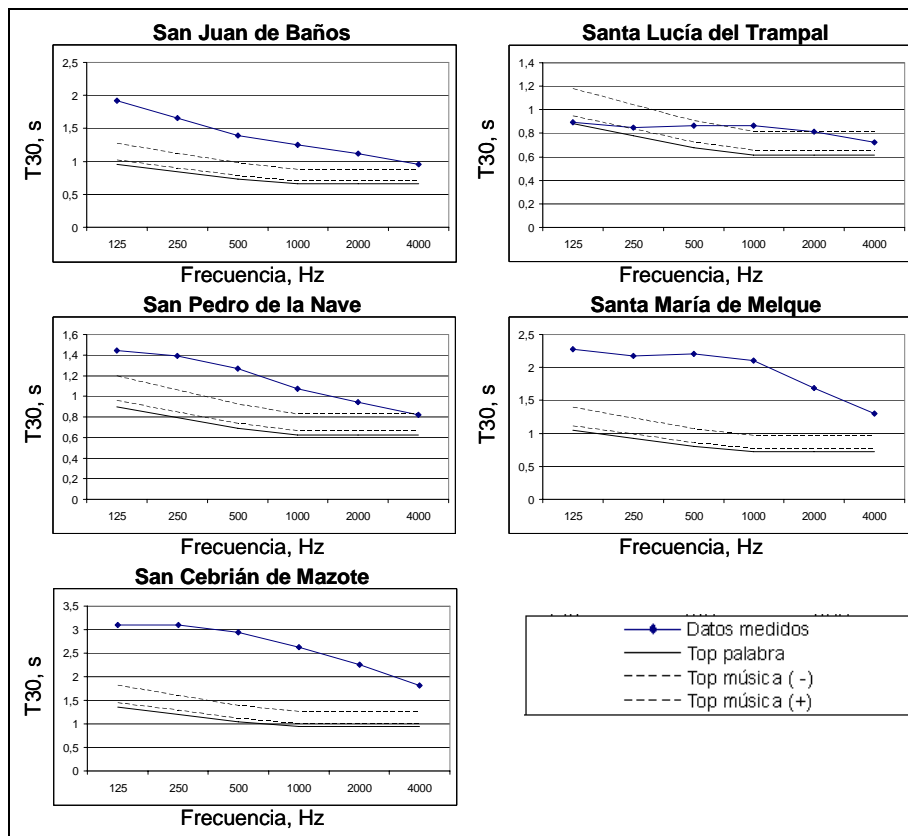


Figura 5 – Comparación de los tiempos de reverberación con los valores óptimos

4.2 Otros parámetros acústicos.

En las tablas siguientes se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar de los resultados obtenidos para diferentes parámetros de relación de energía temprana/tardía, como C80, D50 y Ts, así como para el parámetro de nivel sonoro G. Todos estos parámetros tienen una gran dependencia de la distancia emisor-receptor, por lo que en general las desviaciones obtenidas en las distintas posiciones microfónicas son considerables. Del análisis de estos parámetros y su comparación con los obtenidos en otras iglesias de periodos históricos diferentes [2-4], se evidencia la existencia de potentes reflexiones tempranas, más importantes en las iglesias de menor tamaño.

Tabla 4 – Promedios y desviaciones estándar de los valores de Claridad C80.

Frecuencia, Hz	C80, dB									
	S.J. de Baños		S.L. del Trampal		S.P. de la Nave		S.M. de Melque		S.C. de Mazote	
	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.
63	-1,61	2,65	2,63	2,72	1,98	2,2	-1,19	3,03	-2,42	2,88
125	-1,48	2,71	1,58	3,78	0,44	2,64	-3,01	2,18	-4,13	2,74
250	-0,38	2,7	2,04	3,67	-0,14	2,67	-2,07	2,13	-4,94	2,59
500	0,54	2,45	2,7	3,41	0,35	2,59	-1,24	2,36	-5,31	3,09
1000	1,61	2,2	2,57	3,28	1,92	2,23	-1,72	1,99	-4,68	3,19
2000	2,2	2,05	3,18	3,01	2,75	2,03	-0,79	1,79	-3,24	2,69
4000	3,49	2,22	4,71	3,18	4,23	1,95	1,37	2,1	-1,56	2,78
8000	6,66	2,33	8,2	3,37	5,95	2	5,46	2,46	1,72	2,69

Tabla 5 – Promedios y desviaciones estándar de los valores de Definición D50.

Frecuencia, Hz	D50									
	S.J. de Baños		S.L. del Trampal		S.P. de la Nave		S.M. de Melque		S.C. de Mazote	
	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.
63	0,34	0,12	0,5	0,13	0,48	0,16	0,33	0,17	0,29	0,14
125	0,3	0,12	0,4	0,21	0,37	0,16	0,21	0,11	0,19	0,09
250	0,34	0,14	0,42	0,2	0,33	0,12	0,25	0,1	0,16	0,09
500	0,38	0,14	0,45	0,19	0,36	0,15	0,31	0,15	0,15	0,12
1000	0,45	0,13	0,46	0,19	0,43	0,14	0,27	0,12	0,18	0,13
2000	0,46	0,13	0,48	0,17	0,48	0,12	0,32	0,11	0,23	0,13
4000	0,52	0,13	0,55	0,17	0,55	0,11	0,43	0,14	0,29	0,14
8000	0,65	0,12	0,68	0,16	0,62	0,1	0,6	0,16	0,42	0,14

Tabla 6 – Promedios y desviaciones estándar de los valores de Tiempo Central Ts

Frecuencia, Hz	Ts, s									
	S.J. de Baños		S.L. del Trampal		S.P. de la Nave		S.M. de Melque		S.C. de Mazote	
	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.
63	165,6	35,9	90,6	26,8	108,3	23	177,8	63,1	231,6	62
125	148,5	27,2	93,6	28,9	114,8	27,7	190,9	42	239,5	49,9
250	125,7	26,6	85,8	27,5	116,8	27,3	166,4	24,1	251,9	45,1
500	105,9	24,3	78,6	26,4	106	24,6	158,1	31,4	247,9	50,8
1000	89,9	20,4	77,5	27,3	84,6	19,4	153,3	27,8	215,6	47,3
2000	81,8	18,8	72,2	24	74,6	16,4	126,4	21,8	181,7	39,3
4000	69,2	17,5	60,6	21,9	62,3	15,1	92,3	21,8	141,3	33,7
8000	47,9	13,8	42,9	17,4	51,2	11,6	55,2	18,4	89,4	22,3

Tabla 7 – Promedios y desviaciones estándar de los valores de Fuerza G

Frecuencia, Hz	G, dB									
	S.J. de Baños		S.L. del Trampal		S.P. de la Nave		S.M. de Melque		S.C. de Mazote	
	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.	Prom.	Desv. Std.
63	21,3	1,0	11,8	6,3	17,7	4,8	13,4	3,8	10,8	3,7
125	18,9	1,1	12,0	5,6	15,1	5,1	14,7	2,6	10,5	3,6
250	19,8	1,0	13,4	4,8	15,2	5,0	14,1	3,2	10,5	3,5
500	19,1	1,2	13,8	4,3	16,0	4,4	14,7	2,8	10,8	3,4
1000	19,1	1,1	13,4	4,4	15,7	4,2	13,8	2,8	10,7	3,3
2000	18,4	1,3	12,0	4,9	15,6	4,4	12,1	3,3	9,6	3,6
4000	21,3	1,0	11,8	6,3	17,7	4,8	13,4	3,8	10,8	3,7
8000	18,9	1,1	12,0	5,6	15,1	5,1	14,7	2,6	10,5	3,6

En lo referente a la inteligibilidad de la palabra, la tabla 8 muestra los valores de RASTI promedio para todas las posiciones microfónicas empleadas en cada iglesia, así como los valores mínimos y máximos. Se observa que los valores obtenidos son mucho más elevados que en otros tipos de iglesias. Como era de esperar, la inteligibilidad es inferior en las iglesias de mayores dimensiones debido a los valores superiores de tiempos de reverberación y al aumento de las distancias fuente-receptor.

Tabla 8 – Valores de RASTI.

	Mínimo	Promedio	Máximo
San Juan de Baños	0,45	0,55	0,71
Santa Lucía del Trampal	0,51	0,6	0,73
San Pedro de la Nave	0,5	0,56	0,69
Santa María de Melque	0,41	0,47	0,57
San Cebrián de Mazote	0,29	0,36	0,65

5 Conclusiones

Se han presentado los resultados de las mediciones acústicas realizadas en diversas iglesias prerrománicas hispanas. Dichas iglesias se han escogido de manera que representen las diferentes tipologías de iglesias de la época en la península ibérica. Se trata en general de iglesias de reducidas dimensiones comparadas con construcciones posteriores, lo que da como resultado unas características acústicas diferenciadas del resto.

En cuanto a los tiempos de reverberación, los valores obtenidos son bajos, con valores de T_{mid} que oscilan entre 0,86 y 2,79 s y la dispersión espacial de los valores es, en general, pequeña. La distribución espectral es uniforme, solamente en las iglesias de mayor tamaño se aprecia una disminución importante de la reverberación en altas frecuencias. Pese a lo moderado de los valores obtenidos, éstos están por encima de los considerados óptimos en función del volumen de los recintos.

Los parámetros que cuantifican la relación de energía temprana/tardía evidencian la presencia de potentes reflexiones tempranas. Asimismo estas reflexiones producen un importante efecto de amplificación del sonido, tal y como se desprende de los valores de la Fuerza Acústica G.

A diferencia de la mayoría de las iglesias de épocas posteriores, la inteligibilidad de la palabra en los recintos estudiados es elevada. Dicha inteligibilidad es inferior en las iglesias de mayor tamaño. A este

respecto hay que hacer notar que en todos los casos las mediciones se han realizado con las iglesias vacías. La presencia de fieles aumentaría la absorción acústica lo que disminuiría la reverberación, aumentando consecuentemente la inteligibilidad. En estas condiciones podríamos decir que la inteligibilidad de la palabra en estas iglesias sería excelente.

Agradecimientos

Agradecemos a los Obispos de Palencia, Valladolid y Zamora y a los párrocos de las iglesias correspondientes, a la Diputación de Toledo, al Excmo. Ayuntamiento de Alcuéscar y a la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Extremadura su colaboración, indispensable para la realización de este estudio.

Referencias

- [1] UNE-EN ISO 3382:2001. *Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos.*
- [2] Sendra, J.J.; Zamarreño, T.; Navarro, J. *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, 1999.
- [3] Cirillo, E.; Martellotta, F. *Worship, Acoustics and Architecture*, Multi-Science Publishing, Essex, 2006.
- [4] Desarnaulds, V.; Carvalho, A.P.O. Analysis of Reverberation Time Values in Churches According to Country and Architectural Style. *8th International Congress on Sound and Vibration*, Hong Kong, 2-6 July 2001, pp. 749-756.