

**ESTUDIO ACÚSTICO DE LAS PRIMERAS EDIFICACIONES  
CISTERCIENSES DE SANTES CREUS Y POBLET.  
RESULTADOS EXPERIMENTALES**

PACS 43.55.Gx

Genaro González<sup>1</sup>, José Maria Roig<sup>1</sup>, Francesc Daumal<sup>2</sup>, Javier Esteve<sup>1</sup>

(1) Dep Ingeniería Mecánica, URV.

Campus Sescelades. Av. dels Països Catalans, 26  
43007 Tarragona

(2) Dpto. Construccions Arquitectòniques I, E.T.S.A.B. UPC.

Avda. Diagonal 649, 08028 Barcelona

E-mail: genaro.gonzalez@urv.cat, josemaria.roig@urv.cat, xavier.esteve@urv.cat,

francesc.daumal@upc.edu

**ABSTRACT**

Once founded the Cistercian monastery a small chapel where build for the monks prayer before starting the construction of the architectural ensemble. The chapel of Sant Esteve in Poblet and the chapel of the Trinitat in Santes Creus belong to this group of buildings. The presence of hermits in the early Cistercian communities, possibly influenced the acoustic design of these, where word and sentence intelligibility was essential. In this paper we present the experimental values of the various acoustic parameters obtained and compared with calculated values using different theoretical models.

**RESUMEN**

Una vez fundado el monasterio cisterciense, se edificaba una pequeña capilla para el culto de los monjes antes de iniciar la construcción del conjunto arquitectónico. La capilla de Sant Esteve en Poblet y la capilla de la Trinitat en Santes Creus pertenecen a este grupo de edificaciones.

La presencia de anacoretas en las primeras comunidades posiblemente influyó en el diseño acústico de estas, donde la inteligibilidad de palabra y oración era esencial. En esta comunicación se presentan los valores experimentales de los distintos parámetros acústicos obtenidos y se comparan con los valores calculados al utilizar distintos modelos teóricos.

**INTRODUCCIÓN**

Tras la fundación de los monasterios, las comunidades tomaban posesión de los terrenos donde se construirían estos así como de las tierras de cultivo, bosques, ríos y propiedades vinculadas a ellos. La estricta contemplación de la Regla de San Benito, disponía que los

monjes debían dedicar varias veces al día a la oración. Esto hacía imprescindible la construcción de un recinto de culto en el nuevo asentamiento.

Así pues, las primeras construcciones en los nuevos monasterios fueron una capilla para la oración y las dependencias para el desarrollo de la vida monástica a su alrededor. Estas dependencias, por su carácter provisional hasta la construcción del monasterio, solían construirse en madera y materiales pobres como adobe o ladrillo. En cambio los recintos de culto, siguiendo los preceptos de San Bernardo, debían estar contruidos en piedra, ya que la morada del señor debería ser perdurable en el tiempo. Por ello, los únicos vestigios de los antiguos monasterios son las Capillas.

Estas capillas eran muy similares en todos los nuevos monasterios. Su planta y sección, así como sus dimensiones seguían el patrón cisterciense. En este trabajo se presentan los valores experimentales de distintos parámetros acústicos obtenidos en las capillas de la Trinitat en Santes Creus y la de Sant Esteve en Poblet, así como los valores teóricos utilizando los modelos de Barron (1).

### **Capilla de la Trinitat**

Iglesia románica pequeña y sencilla, correspondiente al siglo XII, construida bajo el rigor y la austeridad cisterciense, autentica expresión de lo esencial, es la obra superviviente mas antigua del conjunto monástico de Santes Creus. En la actualidad no queda ningún vestigio de las estancias que la rodeaban ya que fueron construidas en madera y materiales pobres.

Fue el primer recinto de culto de la comunidad a la espera de la construcción del templo monástico. Posteriormente, al finalizar las obras del templo, se dedicó a capilla de la enfermería.

Tiene una única nave de planta rectangular, de dimensiones 9,63 m de largo por 5,55 m de ancho. Construida con sillares de travertino, piedra tosca y porosa de ribera. Cubierta por bóveda de cañón ligeramente apuntada, que arranca desde una moldura que recorre todo el perímetro de la iglesia. Su estudiada iluminación se realiza mediante dos ventanas perfectamente dispuestas, la de levante permitía la entrada de las luces del alba, iluminando los rezos de maitines, y la de poniente proporcionaba las ultimas luces del crepúsculo, cuando los monjes despedían el día con las completas. Se accede por una puerta de medio punto adovelada y exenta de decoración.

### **Capilla Sant Esteve**

Los monjes fundadores de Poblet se establecieron en la llamada granja Mitjana mientras se replanteaban y se cimentaban las construcciones del futuro monasterio. Las primeras construcciones de la granja fueron las que podemos encontrar actualmente en la zona este del monasterio actual, junto a la muralla: la sala del Juego de Pelota (probablemente de 1163) y la Capilla de Sant Esteve (1180).

Esta ultima fue promovida por el Abad Esteve I (1160-1165) cuando era obispo de Huesca. No se conocen sus autores, aunque es posible que fueran los propios monjes de la comunidad quienes la diseñaran y construyeran. Fue utilizada como iglesia mientras el templo abacial estaba en construcción. Actualmente sigue usándose como recinto de plegaria cuando estas coinciden con el horario de visitas al monasterio.

Se trata de una construcción de una sola nave, de planta rectangular de dimensiones reducidas, 6,05 m de ancho y 10,49 m de largo, cubierta por vuelta de cañón ligeramente apuntada, construida con sillares de dimensiones regulares i volumétricamente bien distribuidos.

En el muro de levante se abre un gran ventanal de medio punto por donde entrarían las primeras luces del día durante la oración. En el muro sur hay dos hornacinas destinadas a la credencia y una en el muro norte, donde estaba el sagrario

Responde plenamente a los cánones estilísticos cistercienses.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Las medidas se han realizado con los recintos vacíos. Las mediciones de ruido de fondo se han realizado utilizando un sonómetro CESVA mod SC-310 configurado en el modo de bandas de octava, durante un período de de aproximadamente 6 min. La valores experimentales del tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ,  $T_{20}$ ), tiempo de caída inicial (EDT), claridad musical (C80), claridad (C50), definición de la palabra ( $D_{50}$ ) y tiempo central ( $T_s$ ) se han obtenido a partir de las respuestas al impulso producido al excitar los recintos con señales sinusoidales de barrido logarítmico en frecuencia mediante el software modelo MORSET DEVELOPMENT SOUND WIN MLS 2004 nivel 5 (Room/Speech Plus).

Dichas señales se han emitido mediante una fuente omnidireccional dodecaédrica AVM DO-12, conectada a un amplificador de potencia Behringer modelo EUROPOWER EPQ 1200 y se han recogido con un micrófono multipatrón Audio Técnica AT 4050, el equipo se completa con una tarjeta de sonido de 2 canales de alta calidad DIGIGRAM UAX-220-MIC, con entrada USB.

También se ha medido el tiempo de reverberación aplicando el método de impacto utilizando una pistola de fogeo KIMAR S.R.L. Modelo 85 Auto Calibre 9 mm Código 401008 y el sonómetro CESVA mod SC 310..

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los valores del ruido de fondo así como sus errores estándar en bandas de octava obtenidos en las capillas de la Trinitat en Santes Creus y de Sant Esteve en Poblet.

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>8000</i>
<i>Ruido de fondo (dB) Trinitat</i>	29,05	21,43	16,84	20,75	14,00	13,07	10,20
<i>Error estandar</i>	0,27	1,23	0,86	1,42	1,27	1,12	0,71
<i>Ruido de fondo (dB) Sant Esteve</i>	17,91	16,52	14,56	15,81	13,92	13,29	11,18
<i>Error estandar</i>	0,53	0,70	1,19	1,62	0,79	1,17	0,23

Tabla1 Valores del ruido de fondo y su error estándar en bandas de octava obtenidos en las Capillas de la Trinidad (Santes Creus) i Sant Esteve (Poblet)

Se observan valores muy pequeños del ruido de fondo en ambas capillas, lo que las hace muy aptas para la oración. En la actualidad, la comunidad cisterciense de Poblet continua utilizando la Capilla de Sant Esteve para sus oraciones, y es uno de los espacios no accesibles al publico.

En la Tabla 2 se presenta la media de los valores experimentales de RT30, RT20, EDT, Tiempo central, C50, C80 y D50 en bandas de octava obtenidos para la Capilla de la Trinitat utilizando el software WinMLs, así como los errores estándar de dichas medidas.

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>8000</i>
<i>RT30 (s)</i>	1,82	1,85	1,51	1,21	1,00	0,76	0,51
<i>Error estandar</i>	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>RT20 (s)</i>	1,77	1,82	1,48	1,20	0,99	0,75	0,49
<i>Error estandar</i>	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>EDT (s)</i>	1,73	1,72	1,49	1,2	0,96	0,69	0,45
<i>Error estandar</i>	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
<i>Ts (ms)</i>	127	127	102	83	66	47	28
<i>Error estandar</i>	4	4	5	4	4	5	3
<i>C50 (dB)</i>	-2,5	-3,4	-1,5	-0,4	0,9	3,4	6,8

<i>Error estandar</i>	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8
<i>C80 (dB)</i>	0,0	-0,4	1,0	2,2	3,7	6,7	11,1
<i>Error estandar</i>	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,6	0,7
<i>D50 (%)</i>	36	32	42	48	55	67	82
<i>Error estandar</i>	2	3	3	3	3	4	2

Tabla 2

En la Tabla 3 se presenta la media de los valores experimentales de RT30, RT20, EDT, Tiempo central, C50, C80 y D50 en bandas de octava obtenidos para la Capilla de Sant Esteve utilizando el software WinMLS, así como los errores standard de dichas medidas.

<i>Frecuencia (Hz)</i>	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>RT30 (s)</i>	2,95	2,30	2,22	2,25	1,96	1,49	0,95
<i>Error estandar</i>	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>RT20 (s)</i>	3,03	2,22	2,18	2,25	1,95	1,45	0,92
<i>Error estandar</i>	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>EDT (s)</i>	2,86	2,15	2,10	2,22	1,88	1,36	0,84
<i>Error estandar</i>	0,09	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
<i>Ts (ms)</i>	191	148	145	154	128	88	51
<i>Error estandar</i>	8	9	4	6	5	4	3
<i>C50 (dB)</i>	-3,4	-3,3	-3,2	-3,6	-2,7	-0,3	3,0
<i>Error estandar</i>	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3
<i>C80 (dB)</i>	-1,7	-1,0	-1,1	-1,6	-0,6	2	5,6
<i>Error estandar</i>	0,4	0,6	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
<i>D50 (%)</i>	32	32	33	31	36	48	66
<i>Error estandar</i>	3	3	3	3	3	3	3

Tabla 3

Al comparar los valores obtenidos experimentalmente del tiempo de reverberación, del tiempo de caída inicial y el tiempo central se observa que son apreciablemente más altos para la capilla de Sant Esteve que para la de la Trinitat.

En la Tabla 4 se comparan los valores del tiempo de reverberación obtenidos en las capillas de la Trinitat (T) y de Sant Esteve (SE) utilizando el software WinMLS (W) y el método de impacto mediante disparo (I).

<i>Frecuencia (Hz)</i>	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>RT30 (s) (T, W)</i>	1,82	1,85	1,51	1,21	1,00	0,76	0,51
<i>Error estandar</i>	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>RT30 (s) (T, I)</i>	1,79	1,86	1,50	1,23	0,95	0,65	0,41
<i>Error estandar</i>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>RT30(s) (SE, W)</i>	2,95	2,30	2,22	2,25	1,96	1,49	0,95
<i>Error estandar</i>	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>RT30 (s) (SE, I)</i>	3,05	2,29	2,21	2,25	1,83	1,28	0,72
<i>Error estandar</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabla 4

De la observación de los valores de la Tabla 4 cabe destacar que los valores obtenidos utilizando ambos métodos es prácticamente coincidente para frecuencias comprendidas entre

125 y 1000 Hz, mientras que para frecuencias superiores se aprecian diferencias significativas con valores menores utilizando el método de impacto.

## METODOS TEORICOS

### CALIDEZ

Al tratarse de capillas donde el canto en la liturgia es fundamental es interesante obtener la respuesta a frecuencias graves de la sala y valorar la riqueza, suavidad y melosidad de la misma, siendo el valor optimo 1,2 para salas de música.

La ecuación que define la calidez es la relación entre el valor medio del TR a frecuencias graves y el valor medio a frecuencias medias (eq.1)

$$I_{calidez} = \frac{TR(125Hz) + TR(250Hz)}{TR(500Hz) + TR(1kHz)} \quad \text{eq.1}$$

Aplicando los valores de TR para la Capilla de la Trinidad (eq.2) obtenemos el valor de 1,35.

$$I_{calidez} = \frac{1,82 + 1,85}{1,51 + 2,72} = 1,35 \quad \text{eq.2}$$

Del mismo modo , en la Capilla de Sant Esteve (eq.3) el valor resultante es de 1,17

$$I_{calidez} = \frac{2,95 + 2,30}{2,22 + 2,25} = 1,17 \quad \text{eq.3}$$

### BRILLO

El brillo es igualmente importante en las capillas a estudio ya que cuantifica la respuesta a frecuencias altas. Los valores óptimos serian los cercanos a 1, difícil de alcanzar debido a la absorción del aire. En ningún caso son aconsejables valores inferiores a 0,8.

El índice de brillo se obtiene a partir de la relación entre el valor medio de los TR de frecuencias altas y el valor medio del TR para frecuencias medias. (eq.4)

$$I_{brillo} = \frac{TR(2kHz) + TR(4kHz)}{TR(500Hz) + TR(1kHz)} \quad \text{eq.4}$$

Para la Capilla de la Trinidad (eq.5) obtenemos el valor de 0,65.

$$I_{brillo} = \frac{1,00 + 0,76}{1,51 + 1,21} = 0,65 \quad \text{eq.5}$$

En la Capilla de Sant Esteve (eq.6) se obtiene un resultado de 0,77

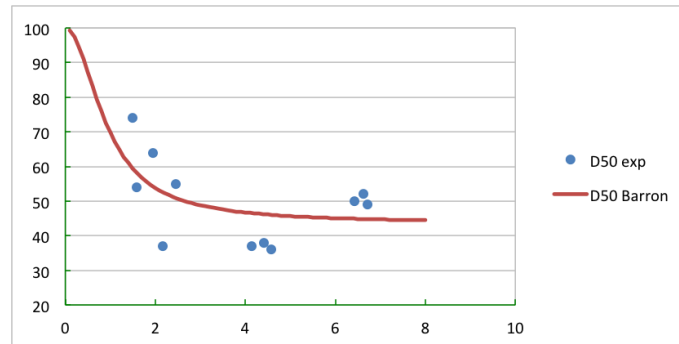
$$I_{brillo} = \frac{1,96 + 1,49}{2,22 + 2,25} = 0,77 \quad \text{eq.6}$$

### DEFINICION (D50)

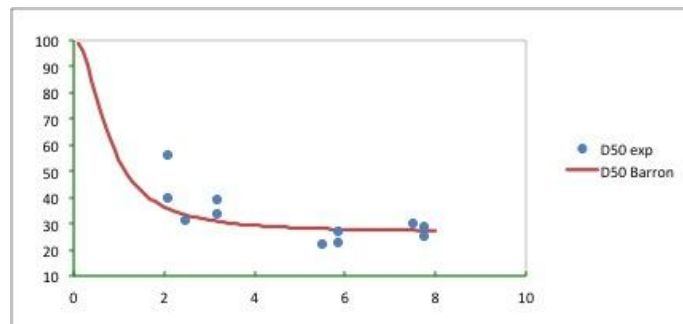
El índice de definición se expresa según la relación (eq.7) definida por Barron (1).

$$D_{50} = \frac{(d + e_m)_{r=0,08}}{(d + e_m + I_B)_{r=0,08}} \cdot 100 \quad \text{eq.7}$$

En las graficas 1 y 2 se representan los valores obtenidos experimentalmente para ambas capillas la frecuencia de 1kHz comparadas con el modelo teórico.



Gráfica 1. D<sub>50</sub> (1kHz) Capilla de la Trinidad .Santes Creus



Gráfica 2. D<sub>50</sub> (1kHz) Capilla de Sant Esteve. Poblet

### INDICE DE CLARIDAD DEL LENGUAJE (C<sub>50</sub>)

El indicador de la sonoridad del lenguaje según las teorías de Barron (1) viene expresado por la fórmula matemática (eq.8). Los valores ideales para el lenguaje se consideran C<sub>50</sub> > -1,5 dB.

$$C_{50B} = 10 \log_{10} \frac{d + e_B}{I_B} \quad \text{eq. 8}$$

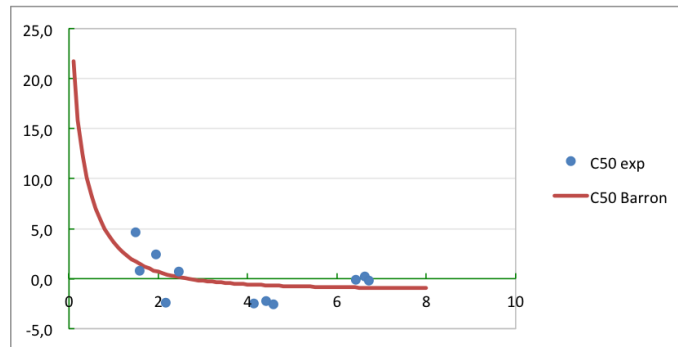
Esta expresión divide la energía en tres factores, el sonido directo (d) (eq.9), la energía reflejada temprana (e<sub>B</sub>)(eq.10) y la energía reflejada tardía (I<sub>B</sub>).

$$d = \frac{100}{r^2} \quad \text{eq. 9}$$

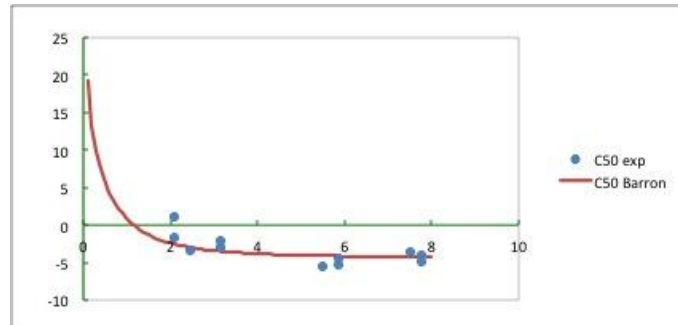
$$e_B = \frac{31200T}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} \left( 1 - e^{-\frac{13,82t}{T}} \right) \quad \text{eq. 10}$$

$$I_B = \frac{31200T}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} e^{-\frac{13,82t}{T}} \quad \text{eq. 11}$$

En las graficas 3 y 4 se ofrece una comparativa entre los valores de  $C_{50}$  obtenidos experimentalmente para frecuencias de 1kHz y la curva resultante de la aplicación de las ecuaciones anteriores propuesta por las teorías de Barron.



Grafica 3.  $C_{50}$  (1kHz) Capilla de la Trinidad .Santes Creus

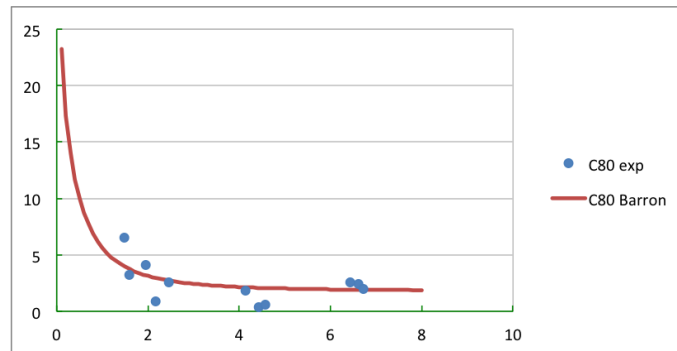


Grafica 4.  $C_{50}$  (1kHz) Capilla de Sant Esteve. Poblet

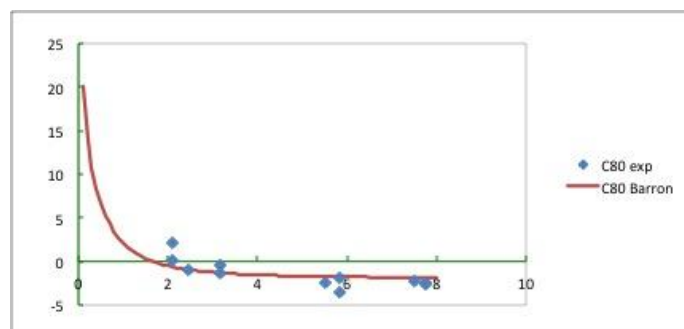
### INDICE DE CLARIDAD DE LA MUSICA $C_{80}$

Asi mismo es interesante valorar los resultados de  $C_{80}$  en las capillas en estudio, ya que como ya se ha comentado anteriormente, la liturgia cantada esta constantemente presente en el uso de las mismas.

Las graficas 5 y 6 comparan los valores obtenidos experimentalmente con los teoricos propuestos por Barron para frecuencias de 1kHz.



Gráfica 5.  $C_{80}$  (1kHz) Capilla de la Trinidad .Santes Creus



Gráfica 6.  $C_{80}$  (1kHz) Capilla de Sant Esteve.Poblet

## CONCLUSIONES

Siendo las dimensiones y proporciones de ambas capillas muy similares, así como el sistema de construcción, su estilo y material primigenio de construcción casi idéntico, se podría deducir que su comportamiento acústico es parecido.

Los niveles de ruido de fondo obtenido en las dos capillas es bajo, muy apto para la función arquitectónica para la que fue concebida la edificación, el culto y recogimiento en el momento de la oración, fundamental en la forma de vida cisterciense. Puede apreciarse que los valores en Sant Esteve son menores ya que esta capilla se encuentra dentro del recinto privado de la comunidad de Poblet, rodeado de silencio, mientras que la capilla de la Trinitat esta exenta y el ruido de fondo esta condicionado a las interferencias típicas de campo abierto.

En cuanto a los valores obtenidos de tiempos de reverberación, EDT y  $T_s$ , podemos apreciar que en la capilla de Poblet estos valores son superiores a la de Santes Creus. Esto es debido a las intervenciones que sobre los muros de Sant Esteve se han realizado con el tiempo. Diferentes hornacinas y pasos abiertos, así como introducción de nuevos materiales, bancos y diferentes objetos, han desvirtuado la proporción del diseño inicial, con paredes lisas de piedra, sin ornamentos, tal y como marca la regla de San Benito, que por su parte si mantiene la capilla de la Trinitat.

Los valores de calidez en ambas capillas se acercan al valor optimo para salas de música. Estos resultados son muy relevantes, ya que la oración cantada tiene unos registros graves. En este caso, ambos espacios arquitectónicos responden perfectamente a los parámetros acústicos deseables de calidez para una buena audición de música.

En el caso del brillo, los valores están por debajo de lo aconsejable. Aunque los valores de frecuencias agudas no son tan importantes para la liturgia cisterciense, estos valores no distan demasiado de los mínimos exigidos actualmente para una sala de audición musical.



Como se aprecia en las graficas 1 a 6, los valores obtenidos para los valores de Definición D50, Claridad de lenguaje C50 y Claridad de la música C80, se adaptan a los valores teóricos propuestos por Barron. En el caso de C50 y C80, los valores están muy próximos a la curva ideal, lo que nos indica el buen comportamiento para la inteligibilidad de la música y la palabra.

En resumen, con los datos obtenidos, se deduce la muy buena adecuación acústica de las edificaciones para el uso que fueron concebidas. Espacios para el recogimiento en silencio, con bajo nivel de ruido de fondo, que ayuden al monje en su acercamiento a lo divino. Espacios que a su vez deben albergar los múltiples oficios litúrgicos diarios, celebrados mediante canto de voces masculinas, primordialmente agudas, y que han dado unos resultados experimentales muy adecuados para todos los matices de estas liturgias.

### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo esta siendo posible gracias a la colaboración del Museu d'Historia de Catalunya como propietario del monasterio de Santes Creu y a la comunidad de Poblet, en especial al Padre Prior Lluç Torcal.

### **REFERENCIAS**

- (1) M. Barron and L. J. Lee, "Energy relations in concert auditoriums I," The Journal of the Acoustical Society of America. 84, 618–628 1998.