



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

**AURALIZACIÓN DEL CANTO MOZÁRABE EN UNA IGLESIA
PRE-ROMÁNICA**

PACS: 43.55.Ka

Antonio Pedrero¹, Alexander Díaz-Chyla¹, Sönke Pelzer², Martin Pollow², César Díaz¹, Michael Vorländer².

¹Grupo de investigación en Acústica Arquitectónica. Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Arquitectura. Avenida Juan de Herrera nº4, 28040 Madrid, España.

diazchyla@gmail.com, antonio.pedrero@upm.es, cesar.diaz.sanchidrian@upm.es

²Institute of Technical Acoustics RWTH Aachen University. RWTH Aachen University. Neustraße 50, 52066 Aachen, Germany

spe@akustik.rwth-aachen.de, mvo@akustik.rwth-aachen.de

ABSTRACT

Acoustic Virtual Reality technology offers a highly appropriate tool for the reconstruction of the acoustic intangible heritage of the sound of historical enclosures.

This work is part of a research project whose aim is the virtual restoration of the sound of the Old Hispanic Rite, auralizing the Mozarabic Chant in Pre-Romanesque churches of the Iberian Peninsula. This paper shows the most relevant results of the auralization of Santa María de Melque church. For that purpose, an acoustic virtual model has been created according to archaeological documentation of the original building conditions, anechoic recordings of several Early Mozarabic Chant musical pieces have been recorded and auralization corresponding to Old Hispanic liturgical Rite multiple settings has been completed.

RESUMEN

Las tecnologías de realidad acústica virtual ofrecen una herramienta muy apropiada para la reconstrucción del patrimonio inmaterial del sonido de los recintos históricos.

Este trabajo es parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es la restauración virtual del sonido del Antiguo Rito Hispánico y que consiste en la auralización del Canto Mozárabe en una serie de iglesias pre-Románicas de la península ibérica. En este caso se presentan los resultados más relevantes de las auralizaciones realizadas para la iglesia de Santa María de Melque. Para ello se ha elaborado un modelo acústico virtual de la iglesia en las condiciones que, según la documentación arqueológica, tenía el recinto original, se han realizado grabaciones anecoicas de una serie de piezas del repertorio primitivo del Canto Mozárabe y se han efectuado las auralizaciones correspondientes a diferentes configuraciones litúrgicas del Antiguo Rito Hispánico.

1. INTRODUCCIÓN

Las iglesias prerrománicas hispánicas constituyen un valioso patrimonio artístico-arquitectónico que está siendo objeto en la actualidad de numerosos estudios en el campo de la arqueología enfocados a conocer la datación precisa de los monumentos, a la reconstrucción de sus características arquitectónicas originales y a la interpretación funcional de sus espacios.

El culto vigente en la época en la que se construyeron estas iglesias es el denominado “Antiguo Rito Hispánico” y es la liturgia que celebraban los cristianos de la península ibérica hasta la implantación del culto romano a mediados del siglo XI. Al igual que en el resto de liturgias cristianas primitivas, la música era el elemento fundamental a partir del cual se articulaban todos los actos litúrgicos. La música del Antiguo Rito hispánico, denominada “Canto Mozárabe”, constituye sin duda el repertorio litúrgico-musical más rico de la alta edad media en occidente, aunque por desgracia, debido a las imperfecciones de la notación musical empleada en la época, la mayoría de las melodías originales se han perdido. Las investigaciones que se están llevando a cabo en el ámbito de la musicología han logrado recuperar, hasta el momento, una veintena de las melodías originales del canto mozárabe.

Las modernas tecnologías de realidad acústica virtual constituyen una valiosa herramienta para la recuperación del patrimonio sonoro perdido ya que permiten recrear virtualmente los sonidos producidos en cualquier espacio, real o virtual. En el caso de su aplicación al antiguo rito hispánico, si se dispone de un modelo acústico de las iglesias prerrománicas en su estado original y de grabaciones anecoicas de las melodías del canto mozárabe recuperadas, se puede restituir virtualmente el sonido que percibirían, hace un milenio, los asistentes a los actos litúrgicos correspondientes. La veracidad de esta restauración sonora dependerá del grado de fidelidad con respecto a sus características de la edad media de los datos de partida: la del modelo acústico generado, la de la música interpretada y la de las características de la liturgia en lo referente a las posiciones de los oficiantes y de los oyentes.

En este trabajo se presentan las auralizaciones realizadas sobre la iglesia de Santa María de Melque, para una serie de piezas musicales del repertorio del canto mozárabe. Se han realizado diferentes auralizaciones estáticas, representando diferentes configuraciones litúrgicas, así como auralizaciones dinámicas en las que se simulan movimientos de los emisores y/o de los receptores.

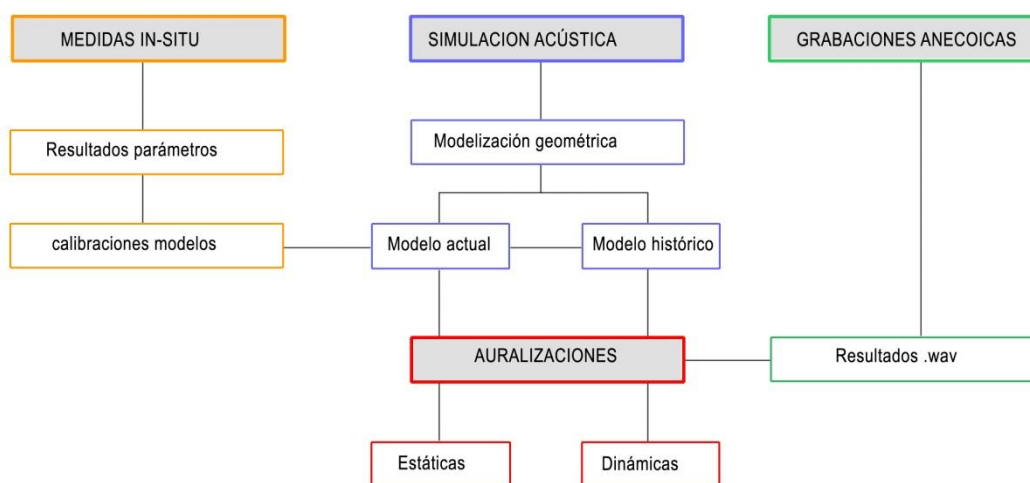


Figura 1. Esquema de fases de trabajo para la auralización

2. LA IGLESIA DE SANTA MARÍA DE MELQUE

La iglesia de Santa María de Melque se ubica en el término municipal de San Martín de Montalbán, en el norte de la provincia de Toledo, y es uno de los templos de la alta edad media mejor conservados de la península ibérica. De estructura totalmente abovedada, conserva íntegras sus distintas naves, por lo que constituye una pieza fundamental para el estudio de las características acústicas de las iglesias prerrománicas hispanas.

Según las investigaciones arqueológicas realizadas [1], la iglesia formaba parte de un conjunto monástico del que se han perdido el resto de las construcciones. Dichas investigaciones no han arrojado datos determinantes para la datación de la iglesia, siendo considerada por algunos investigadores como visigótica, construida a mediados del siglo VII, mientras que otros fijan su construcción en el siglo VIII, lo que la calificaría como plenamente mozárabe.

La planta de la iglesia tiene 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. En cuanto al alzado, toda la iglesia está abovedada sobre arcos de herradura.

En la actualidad, la estructura de la iglesia permanece intacta. Se ha perdido la decoración de estuco de las paredes, del que solo se conserva un pequeño fragmento. Existe además una habitación adosada en la zona noreste que, según la documentación arqueológica consultada, habría sido añadida con posterioridad a la construcción de la iglesia, al igual de otras habitaciones laterales que se no se han conservado. En una reciente restauración se ha sobrepuesto un suelo de tarima sobre el suelo de "opus signinum" original.

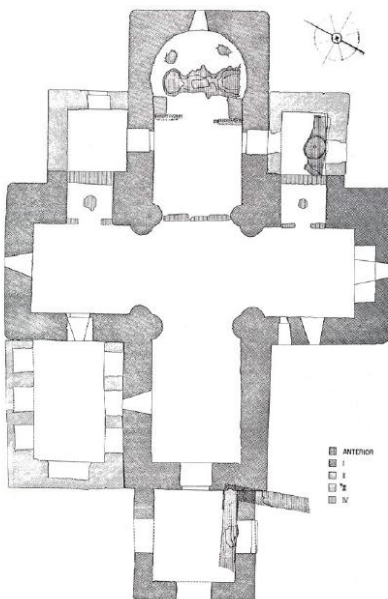


Figura 2. Planta de la iglesia, según Caballero y Latorre (1980).

Se realizaron mediciones acústicas en la iglesia que sirvieron para validar el modelo acústico de la misma en su situación actual [2].

Para la reconstrucción virtual de la iglesia en su estado original, se ha considerado que en su primer momento había dos cancelas altas formados por una estructura de madera con placas de cancel bajas y cortinas, uno situado en la embocadura del ábside, a modo de iconostasio, y otro que separaría el anteábside del crucero. El espacio del anteábside, flanqueado por los dos cancelas, sería el destinado al coro. En cuanto a los revestimientos de las paredes, de acuerdo con las investigaciones de Caballero Zoreda [1], la sillería de granito estaba cubierta de estuco

en relieve y pintado en el cimborrio y la nave de cabecera (desde la imposta), mientras que las naves laterales y la de pies estarían desnudas.

3. GRABACIONES ANECOICAS

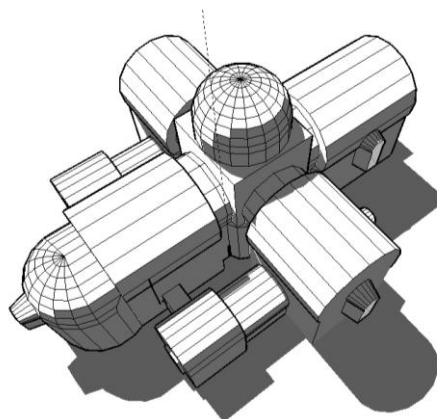
Para realizar las auralizaciones del sonido del antiguo rito hispánico se han realizado grabaciones en cámara anecoica de una serie de piezas del repertorio original del canto mozárabe [3]. Se ha grabado un total de ocho piezas musicales; siete de ellas pertenecen al Oficio de Difuntos, y la octava al Rito de Consagración del Altar. Con objeto de caracterizar diferentes timbres vocales, la grabación ha sido realizada por seis cantantes diferentes. Cada uno de ellos ha interpretado todas las piezas musicales elegidas.

Las piezas grabadas han sido interpretadas por miembros del grupo musical Schola Antiqua, que es un grupo musical dedicado al estudio, investigación e interpretación de la música antigua y en especial del canto litúrgico medieval. Sus investigaciones en el ámbito del canto mozárabe y las grabaciones discográficas realizadas de este repertorio los acreditan como uno de los grupos musicales más especializados en el canto mozárabe.

Las grabaciones se han realizado en la cámara anecoica del CSIC en Madrid, utilizando una pareja de micrófonos de alta calidad, de los que se extraen las señales principales para la auralización, y un array esférico compuesto por 31 micrófonos, con objeto de obtener además información sobre la directividad de la emisión sonora de los cantantes.

4. MODELO GRÁFICO

Se procedió a la elaboración de dos modelos gráficos de la Iglesia de Santa María de Melque. Un primer modelo con gran detalle para su visualización y un segundo modelo simplificado, respetando las características arquitectónicas principales del recinto para desarrollar las simulaciones acústicas. Ambos modelos fueron elaborados a partir del programa AutoCAD partiendo de la documentación anteriormente citada y posteriormente se realizaron exportaciones a SketchUp8. El motivo de la utilización de este programa es la facilidad de elaborar herramientas de exportación propias a programas de simulación acústica y de visualización, así como la facilidad de colocación de fuentes dinámicas y estáticas en el modelo y establecer distintas configuraciones.



Modelo simplificado	
Nº Polígonos	1495
Volumen	1258m ³

Figura 3. Modelo acústico interior de la Iglesia en su estado original.

4.1 Simulación acústica

A partir del modelo simplificado se ha elaborado la simulación acústica. Para este trabajo se utilizó el programa RAVEN [7], herramienta de simulación acústica elaborada por Institute of Technical Acoustics, RTWH Aachen University. La biblioteca de materiales del programa fue ampliada, introduciendo los materiales históricos utilizados [1] en esta iglesia y sus características acústicas. Las herramientas propias de SketchUp de dotar de materialidad a las superficies y las herramientas desarrolladas para su exportación a RAVEN, facilitaron la velocidad de trabajo y la versatilidad de posibles modificaciones, así como la modificación de paramentos o la incorporación de elementos decorativos. Este tipo de programas permite una

respuesta inmediata a la hora de diseñar acústicamente los espacios, obteniendo de manera casi instantánea los parámetros de reverberación, claridad, etc.

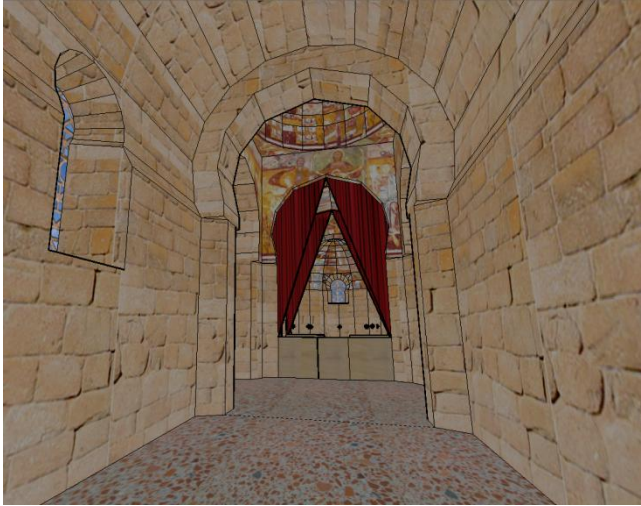
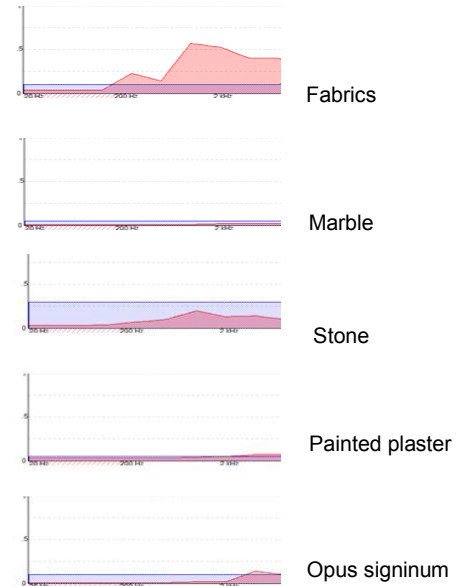


Figura 4. Modelo en SketchUp de la Iglesia en su estado original y coeficientes de absorción utilizados en el modelo acústico.



Una vez realizada la simulación, se procedió a la comparación de los valores de los principales parámetros acústicos del modelo actual y los de las mediciones in-situ para posteriormente, una vez calibrado el modelo, realizar los cambios necesarios para adecuarlo a las condiciones originales de la iglesia y proceder a las auralizaciones.

4.2 Posiciones de emisores y receptores

Uno de los aspectos controvertidos en la investigación del antiguo rito hispánico es el de la ubicación física de los participantes de la liturgia en el espacio del templo. Del análisis de las fuentes históricas, los diferentes investigadores [4-6] coinciden en la división del templo en tres zonas totalmente diferenciadas y ordenadas en función de su alejamiento del altar: el ábside, donde se encuentra el altar y donde estarían los celebrantes, el coro, donde se colocaría el resto de la congregación, y las naves, ocupadas por la asamblea. También hay consenso en reconocer la existencia de procesiones rituales en el interior de los templos.

En la auralización del canto mozárabe en la Iglesia de Santa María de Melque se han utilizado diferentes posiciones de las fuentes emisoras, simulando las posibles posiciones de los cantantes en función del tipo de canto (antifonal o responsorial) y el tipo de culto (público o privado), de acuerdo con las fuentes consultadas. También se ha simulado el movimiento de los oficiantes producido en una procesión.

Para la ubicación de los receptores se han contemplado dos alternativas: un conjunto de cinco receptores estáticos distribuidos uniformemente a lo largo de la iglesia, y un único receptor que se mueve por el templo siguiendo una determinada trayectoria. Para ello se realizaron dos categorías de auralizaciones según el desplazamiento de las fuentes sonoras y/o receptores, denominándolas auralizaciones estáticas y auralizaciones dinámicas.

-auralizaciones estáticas:

Se procedió a auralizar la iglesia con todas las piezas musicales disponibles y las distintas configuraciones litúrgicas posibles para cinco puntos estáticos ubicados a lo largo de toda la iglesia.

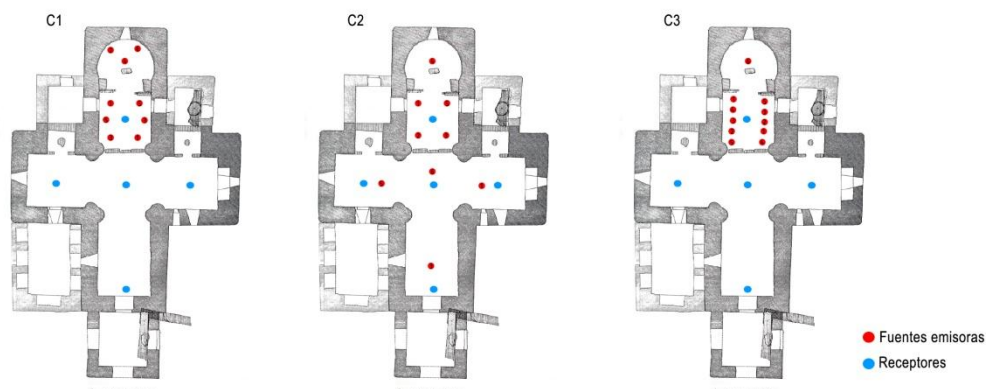


Figura 5. Configuraciones del coro para las auralizaciones estáticas.

-auralizaciones dinámicas:

Se procedió a auralizar la iglesia las fuentes emisoras y/o el receptor en movimiento. Para ello se optó por auralizar dos piezas, Song1: Dies mei Transierunt, un responsorio que se podría utilizar en una procesión y así estudiar el comportamiento de la iglesia con las fuentes dinámicas y Song4: Credo, con una disposición de coro más compacta, estableciendo las fuentes emisoras como estáticas y el receptor en movimiento.

	Canción	Fuente emisora	Fuente receptora
Modelo_D1	Song1: Dies mei Transierunt	Dinámica	Estática
Modelo_D2	Song1: Dies mei Transierunt	Dinámica	Dinámica
Modelo_D3	Song1: Dies mei Transierunt	Estática	Dinámica
Modelo_D4	Song4: Credo	Estática	Dinámica
Modelo_D5	Song4: Credo	Estática	Estática

Tab. 1: Modelos creados para las auralizaciones dinámicas.

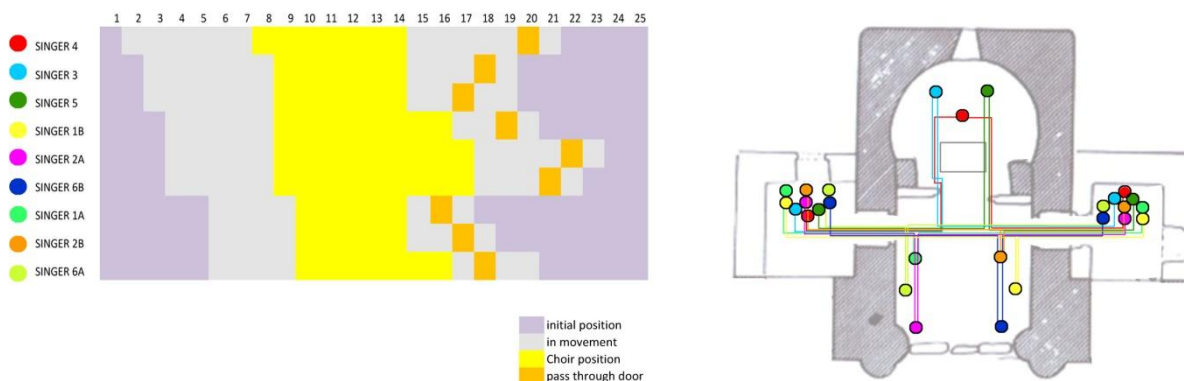


Figura 6. Orden de movimiento y diseño del desplazamiento para las fuentes emisoras dinámicas.

4. AURALIZACIONES

Para las auralizaciones, al igual que para el modelo de simulación acústica, se ha utilizado el programa RAVEN desarrollado por Institute of Technical Acoustics, RTWH Aachen University. La mayor parte de los programas comerciales utilizan un sistema híbrido, combinando un modelo de fuentes imagen y distintos algoritmos de trazado de rayos. Este tipo de programas, permiten auralizaciones pero con situaciones de cálculo cerradas, sin poder modificar todas las características de la escena. En algunos programas, las propiedades del receptor se pueden modificar (posición, orientación, etc.) durante la auralización, pero no así la geometría del recinto, las propiedades de los paramentos, o dotar de desplazamiento a las fuentes sonoras, por lo que hace de RAVEN una herramienta de investigación muy potente y versátil por la velocidad de cálculo para las simulaciones en tiempo real.

La Tabla 2 muestra los ajustes de los parámetros de simulación del programa RAVEN utilizados en las auralizaciones. Como se puede apreciar, en las auralizaciones dinámicas la señal directa y las primeras reflexiones, que se obtienen mediante fuentes imagen, se actualizan para cada bloque de convolución, mientras que la cola final de reverberación, que se obtiene mediante trazado de rayos y que requiere mayor tiempo de cálculo, se actualiza con una cadencia inferior. Esta es la razón por la que RAVEN consigue una auralización dinámica realista con una carga computacional reducida.

Condiciones ambientales	Temperatura del aire	20 °C
	Humedad relativa	50 %
	Presión atmosférica	101325 Pa
Fuentes emisoras	Resolución de la directividad del emisor	10° x 10° esfera completa
	Orden de transición (fuentes imagen)	2
	Número de partículas (trazado de rayos)	10 octavas x 100,000 rayos
Receptores	Resolución temporal (trazado de rayos)	10 ms
	Radio de recepción (trazado de rayos)	0.4 m
HRTF	Base de datos de las HRTF	ITA Aachen Dummy Head
	Resolución de las HRTF	3° x 3° full sphere
Auralización dinámica	Tamaño del bloque de convolución	512 muestras @ 44.1 kHz
	Actualización de fuentes imagen	Cada bloque
	Actualización del trazado de rayos	Desplazamiento de 1m

Tab. 2: Parámetros de simulación utilizados en las auralizaciones dinámicas.

La figura 6 muestra un ejemplo del recorrido de las fuentes emisoras dinámicas a lo largo de la iglesia y el orden de transición de desplazamiento de las mismas. La trayectoria que se diseñó para cada fuente emisora consta de tres posiciones estáticas (comienzo, posición en el coro y final) y los desplazamientos que se realizan entre los puntos. Este proceso fue bastante laborioso por la dificultad de coordinar el desplazamiento de nueve fuentes emisoras simultáneas, evitando el solape de posiciones.

5. CONCLUSIONES

Mediante las tecnologías de realidad acústica virtual, se ha efectuado una posible reconstrucción del sonido original del Antiguo Rito Hispánico en la iglesia de Santa María de Melque. Para ello se han realizado auralizaciones utilizando como material sonoro diferentes piezas del repertorio original del Canto Mozárabe, grabadas en cámara anecoica. El programa de simulación acústica utilizado ha sido RAVEN, desarrollado por Institute of Technical Acoustics, RTWH Aachen University. La capacidad de cálculo en tiempo real y la flexibilidad de dicho software ha hecho posible la auralización de escenas en movimiento, donde tanto los emisores como los receptores se desplazan a lo largo del recinto, lo que ha permitido reconstruir el sonido de las procesiones dentro del templo, que eran características de dicho rito.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a los miembros del grupo Schola Antiqua y en especial a su director, Juan Carlos Asensio, su colaboración altruista en este proyecto. Este trabajo fue posible gracias a la Diputación Provincial de Toledo, que amablemente nos concedió acceso a la iglesia.

7. REFERENCIAS

- [1] Caballero, L.; Latorre, J.I.; “La iglesia y el monasterio visigodo de Santa María de Melque (Toledo). San Pedro de la Mata (Toledo) y Santa Comba de Bande (Orense)”. Excavaciones Arqueológicas en España. Ministerio de Cultura. 1980.
- [2] Díaz, C.; Pedrero, A.; Navacerrada, M. A.; “Acoustic model of the pre-Romanesque church of Santa Maria de Melque”. 19th International Congress on Acoustics. Madrid, Septiembre 2007.
- [3] Pedrero, A.; Pollow. M.; Dietrich, P.; Behler, G.; Vorländer, M.; Díaz, C.; Díaz-Chyla, A.; “Mozarabic Chant anechoic recordings for auralization purposes”. VII Iberian Acoustics Congress; Acoustics European Symposium under the theme of Environmental Acoustics. Évora, Octubre 2012.
- [4] Schlunk H., 1971, “La iglesia de São Gião de Nazaré. Contribución al estudio de la influencia de la liturgia en la arquitectura de las iglesias prerrománicas de la Península Ibérica”, Actas do II Congresso Nacional de Arqueologia, vol. II, pp. 509-528, Coimbra.
- [5] Godoy Fernández, C.; “Arqueología y liturgia: iglesias hispánicas (siglos IV al VIII)”, Barcelona, Universidad de Barcelona, 1995
- [6] Puertas Tricas, R.; “Iglesias hispánicas (siglos IV al VIII). Testimonios literarios”, Madrid, 1975
- [7] Sönke Pelzer; Lukas Aspöck; Michael Vörländer. “Interactive real time simulation and auralization for modifiable rooms”. ISRA 2013. Toronto, Canada.