

SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DE TRES IGLESIAS DE FISAC

PACS: 43.55.-n

A. Bueno; A. L. León; M. Galindo¹.
Universidad de Sevilla, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I, ¹Dpto. Física Aplicada II,
ETS Arquitectura, IUACC.
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España.
Tel.: + 34 954556595. Fax: +34 954557018. ¹Tel. + 34 954556672. Fax: +34 954557892.
E-Mail: anabueno@arquired.es, leonr@us.es, mgalindo@us.es

ABSTRACT

Miguel Fisac was an architect with extensive professional and research experience in Spanish religious architecture in the second half of the twentieth century. The conclusion of the Second Vatican Council (1962-1965), and the importance it gave to the active participation of the faithful and the Liturgy of the Word, made the architect rethink the design space of these religious spaces and include acoustic as the aspect determining the project. This paper analyses and compares the current acoustic conditions of three post conciliar churches made by Fisac, using simulation techniques of the sound field.

RESUMEN

Miguel Fisac fue un arquitecto con una dilatada experiencia profesional e investigadora en la arquitectura religiosa española durante la segunda mitad del siglo XX. La celebración del Concilio Vaticano II (1962-1965), y la importancia que otorgó éste a la participación activa de los fieles y a la liturgia de la Palabra, hicieron al arquitecto replantearse la concepción espacial de estos recintos religiosos e incluir la acústica como aspecto determinante del proyecto. El presente trabajo analiza y compara las condiciones acústicas actuales de tres iglesias postconciliares realizadas por Fisac, empleando técnicas de simulación del campo sonoro.

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones religiosas del arquitecto Miguel Fisac marcaron una nueva concepción del espacio eclesial, constituyendo una de las aportaciones más relevantes en la arquitectura religiosa del siglo XX. Tras la celebración del Concilio Vaticano II (1962-1965), Fisac abandona los rasgos característicos de su arquitectura religiosa preconiliar para incluir las determinaciones litúrgicas de este concilio en sus nuevos proyectos religiosos. A partir de este momento, sus iglesias presentarán una disposición asamblearia en planta (para facilitar la participación plena y activa de los fieles), en torno al presbiterio (donde habrá varios focos de

atención a lo largo de las celebraciones), y las condiciones acústicas tendrán repercusión formal en el proyecto (por la importancia que el concilio otorgó a la palabra y a la predicación).

Tres ejemplos posteriores al citado concilio, construidos en la época en que Fisac estaba investigando en las posibilidades estructurales del hormigón, son la iglesia de Santa Ana de Moratalaz (1965-1971), la iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca (1965), ambas en Madrid, y la iglesia de Santa Cruz de Oleiros, en La Coruña (1967). En la tabla 1 se muestran las principales características dimensionales de las tres iglesias seleccionadas para este estudio.

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES			
IGLESIA	SANTA ANA	CUESTABLANCA	SANTA CRUZ
Volumen (m ³)	3674	3188	3812
Superficie construida (m ²)	567,1	473,6	503,7
Superficie de revestimientos (m ²)	2062,8	1726,3	2335
Longitud media (m)	18,3	13,9	17,6
Anchura media (m)	22,5	25,8	21,1
Altura media (m)	8,9	8,9	10,3
Capacidad (personas sentadas)	466	325	329

Tabla 1. Características dimensionales de las iglesias objeto de estudio.

En la presente comunicación, se analizan y comparan las condiciones acústicas de las mismas, obtenidas mediante simulación del campo sonoro, valorando aspectos subjetivos del oyente: reverberación, inteligibilidad de la palabra y claridad musical, nivel sonoro e impresión espacial.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS IGLESIAS

La **iglesia de Santa Ana de Moratalaz** fue el primer templo que Fisac proyectó siguiendo las directrices litúrgicas del Concilio Vaticano II. Planteó una iglesia de planta ovalada, para agrupar a la asamblea en torno al presbiterio. También el carácter simbólico de las celebraciones tuvo respuesta arquitectónica, de ahí que la razón de ser del muro que conforma el presbiterio, surge por la adecuación del mismo a los distintos momentos de la celebración litúrgica (figura 1). La importancia de la liturgia de la Palabra hizo que Fisac considerase las condiciones acústicas del recinto como parte integrante del proyecto, conformando el muro de fondo con unas superficies convexas, que él llamó *muros dispersivos*, cuyo objetivo era evitar las concentraciones acústicas (figura 3[a]).



Figura 1. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

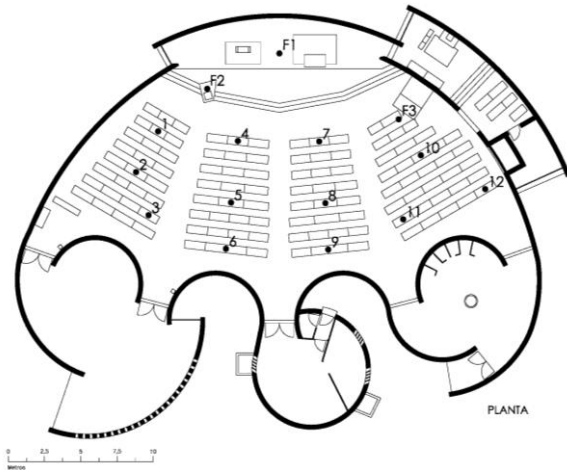
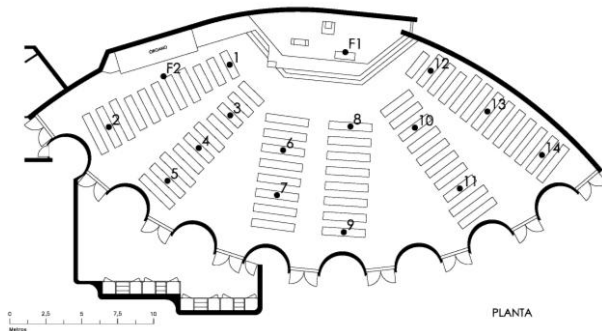
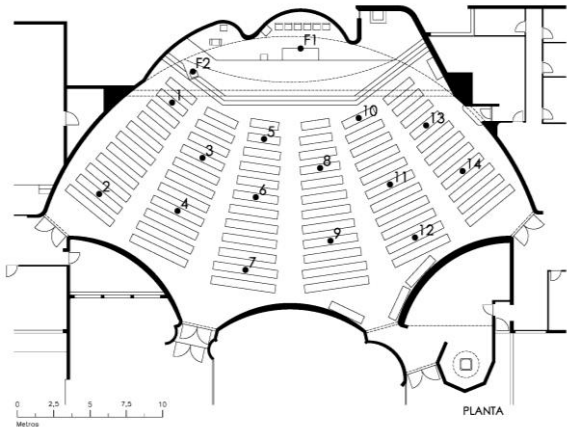
El material empleado en la iglesia es el hormigón visto, ejecutado *in situ* en todos los paramentos verticales, mientras que la cubierta se resuelve mediante *vigas hueso* de hormigón prefabricado, según patente del arquitecto. La caracterización acústica de esta iglesia aparece descrita en [1] y [2].



Figura 2. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca.

En la **Capilla del Colegio de las Religiosas de la Asunción** de Madrid, Fisac emplea las ideas desarrolladas en la iglesia de Santa Ana, aunque

con un carácter más sobrio, resultando una forma ovalada en planta, con eje transversal más marcado, que consigue una mayor aproximación entre el presbiterio y la nave, y por tanto un espacio asambleario. En la cara posterior del óvalo se disponen los *muros dispersivos* formados por elementos cilíndricos convexos de menor tamaño que en la anterior iglesia (figura 3[b]). En este templo, Fisac vuelve emplear el hormigón visto en todos los paramentos verticales y resuelve la cubierta mediante *vigas hueso* de hormigón prefabricado. En las uniones entre dichas vigas dispuso longitudinalmente placas de cartón-yeso que ocultaban tanto las juntas como el cableado de la instalación de iluminación del espacio (figura 2).



En la **iglesia de Santa Cruz de Oleiros**, con planta en forma de vieira y un marcado eje transversal, Fisac consigue un espacio asambleario, garantizando una buena visibilidad del altar desde cualquier punto de la nave. En el muro posterior de la iglesia dispuso los ya conocidos *muros dispersivos*, formados por cuatro semicilindros convexos, que conforman el atrio cubierto de acceso, la sacristía, el baptisterio y la capilla penitencial. La capilla del Santísimo está proyectada como un desdoblamiento lateral de la nave, siendo accesible desde ésta y desde el presbiterio (figura 3[c]). La totalidad del complejo parroquial fue realizado en hormigón armado ejecutado *in situ*, a excepción de la cubierta que se resolvió con piezas prefabricadas de hormigón, a base de grandes vigas longitudinales y nervios transversales (figura 4).



Figura 4. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

En resumen, las iglesias seleccionadas para el presente estudio forman una muestra homogénea, con tipología arquitectónica, tamaño y volumen similares, donde el arquitecto continúa con la investigación estructural del hormigón e integra las determinaciones del Concilio Vaticano II. Tienen en común, la disposición asamblearia de la planta, los *muros dispersivos* en la pared de fondo, el hormigón visto como revestimiento principal y, como veremos a continuación, adolecen los mismos problemas acústicos: elevados tiempos de reverberación y deficiente inteligibilidad para la palabra y claridad musical.

3. SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS. ANÁLISIS Y VALORACIÓN

A partir de las mediciones acústicas realizadas *in situ* en cada iglesia, se elaboraron modelos de simulación que reprodujeran fielmente las condiciones acústicas reales que presentan las mismas. Para lograr la validación de los modelos, se utilizó como parámetro de ajuste el T_{30} , y en ese proceso se fueron modificando los coeficientes de absorción y difusión de los materiales con más incertidumbre. Los modelos se consideran validados cuando los valores simulados difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los medidos [3]. A continuación se realizaron las simulaciones tanto en la hipótesis de iglesia vacía como ocupada [4]. El software de cálculo empleado fue CATT TUCT v1.0f.

Al igual que las mediciones acústicas *in situ*, las simulaciones informáticas proporcionan información sobre aspectos objetivos y subjetivos del oyente asociados a diferentes magnitudes acústicas [5]. Los parámetros analizados en esta comunicación fueron los indicados en la tabla 2:

ASPECTO OBJETIVO Y SUBJETIVO DEL OYENTE		PARÁMETRO	UNIDAD
Reverberación		Tiempo de reverberación: T_{30}	s
Inteligibilidad de la palabra y claridad musical		Definición: D_{50}	-
		Claridad: C_{80}	dB
Nivel Sonoro subjetivo		Fuerza acústica: G	dB
Impresión espacial		Energía lateral precoz: J_{LF}	-
		Coefficiente de correlación cruzada interaural temprano $IACC_E$	-

Tabla 2. Aspectos subjetivos analizados y los correspondientes parámetros acústicos.

Para facilitar la comparación de resultados entre iglesias, en las gráficas que siguen se representan los resultados de cada parámetro acústico, promediados espacialmente, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada y con la fuente en posición 1 (figura 3). Con objeto de dar

una visión del comportamiento espacial, también aparecen representadas las desviaciones estándar. En el caso del T_{30} , se aportan los valores óptimos recomendados para la palabra y la música religiosa, para cada banda de octava.

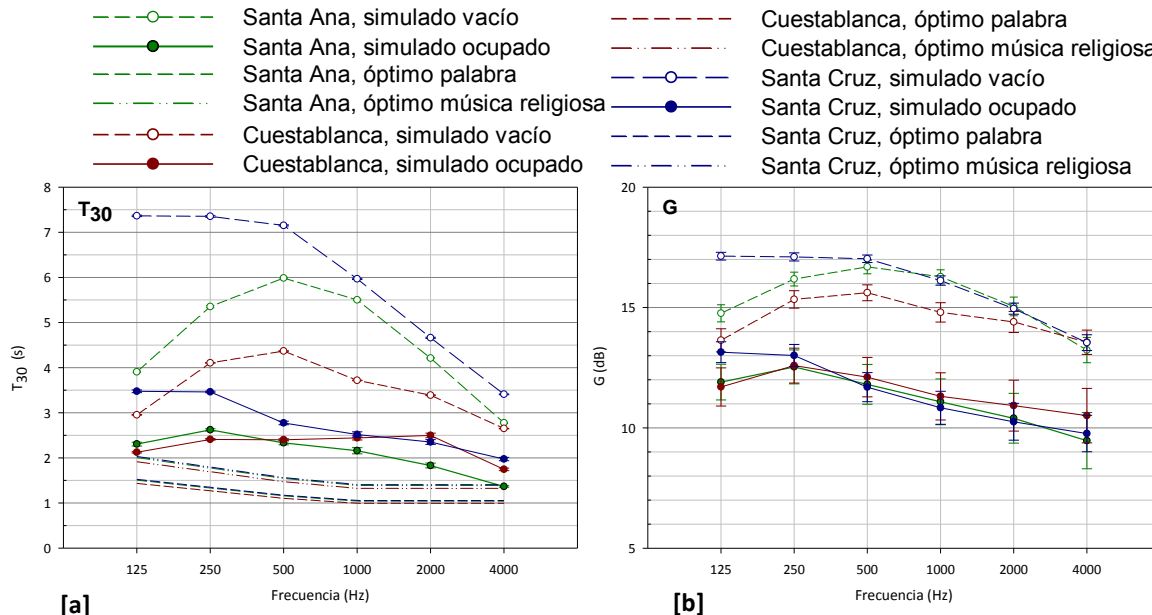


Figura 5. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia. Simulación estado actual vacío y ocupado, fuente 1.

La figura 5[a] refleja que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) para las iglesias vacías son bastante más altos que los óptimos recomendados para estos volúmenes. En las frecuencias centrales, esas desviaciones superan 2.5 s, 4 s y 5 s, en las iglesias de Cuestablanca, Santa Ana y Santa Cruz, respectivamente. Excepto en esta última iglesia, cuyo comportamiento vacío a bajas frecuencias difiere de las otras, los valores más altos del T_{30} se obtienen en las frecuencias medias con disminuciones en graves y agudos, Esta mayor absorción en bajas frecuencias se atribuye al comportamiento como membrana de los delgados y flexibles techos de vigas de hueso, de grandes luces, excepto en la iglesia de Santa Cruz que presenta una mayor rigidez al ser otro tipo estructural. Como es conocido, en la absorción a altas frecuencias tiene repercusión al efecto absorbente del aire.

Al realizar la simulación acústica de los recintos ocupados, los valores del tiempo de reverberación disminuyen considerablemente, aunque siguen siendo superiores a los óptimos recomendados. Como era de esperar, esta falta de absorción sonora provoca deficiencias acústicas en las tres iglesias.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G) en las tres iglesias, presenta resultados muy altos, acordes con los elevados tiempos de reverberación y la poca absorción sonora. La dispersión espacial es mayor cuando los fieles ocupan las iglesias (figura 5[b]).

En cuanto a la definición (D_{50}) y la claridad musical (C_{80}), las figuras 6[a] y 6[b] muestran valores muy bajos en ambos estados de ocupación, consecuencia de la falta de absorción sonora. Por ello, el orden de las curvas de cada iglesia se invierte con respecto al T_{30} . Estos resultados indican deficiencias en la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, que se minimizan cuando las iglesias se ocupan al 100%.

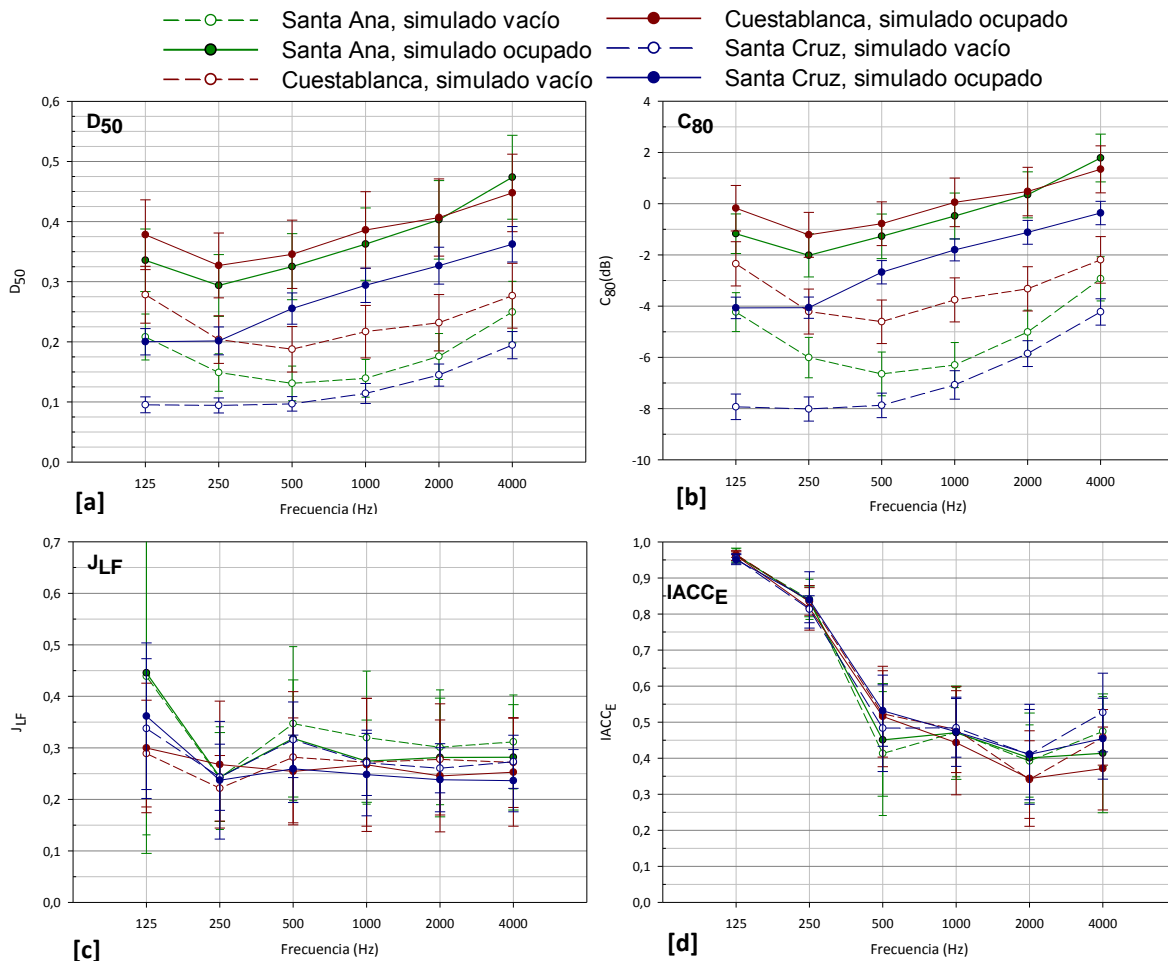


Figura 6. Definición D_{50} , claridad musical C_{80} (dB), fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia. Simulación estado actual vacío y ocupado, fuente 1.

La gráfica de la figura 6[c] refleja el estrecho margen en el que se mueven los valores del J_{LF} simulados para cada frecuencia, siendo muy similares en la configuración vacía y ocupada de cada iglesia. Los niveles de J_{LF} registrados corresponden a una anchura de fuente adecuada, dado que casi todos los resultados están comprendidos entre 0,2 y 0,35.

Los resultados obtenidos para el $IACC_E$ (figura 6[d]) a las frecuencias medias ($IACC_{E3}=0,33$ para Santa Ana, $IACC_{E3}=0,37$ para Cuestablanca y $IACC_{E3}=0,4$ para Santa Cruz) corresponden a una sensación de sonido envolvente y a una amplitud de la fuente sonora calificadas por Beranek (para salas de conciertos), como excelente en el caso de las dos primeras iglesias, y como muy buena, en el caso de la iglesia de Santa Cruz.

4. VISUALIZACIÓN DE LOS FRENTES DE ONDAS SONORAS

Se han realizado animaciones de los frentes de ondas, utilizando la herramienta *Time trace* del programa de simulación CATT TUCT v1.0f, para evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de las ondas sonoras. Este análisis permite conocer aquellas superficies o elementos que más influyen en el comportamiento acústico del recinto. Las condiciones fueron: 100.000 rayos (1kHz), duración 300 ms y 6º orden de reflexión.

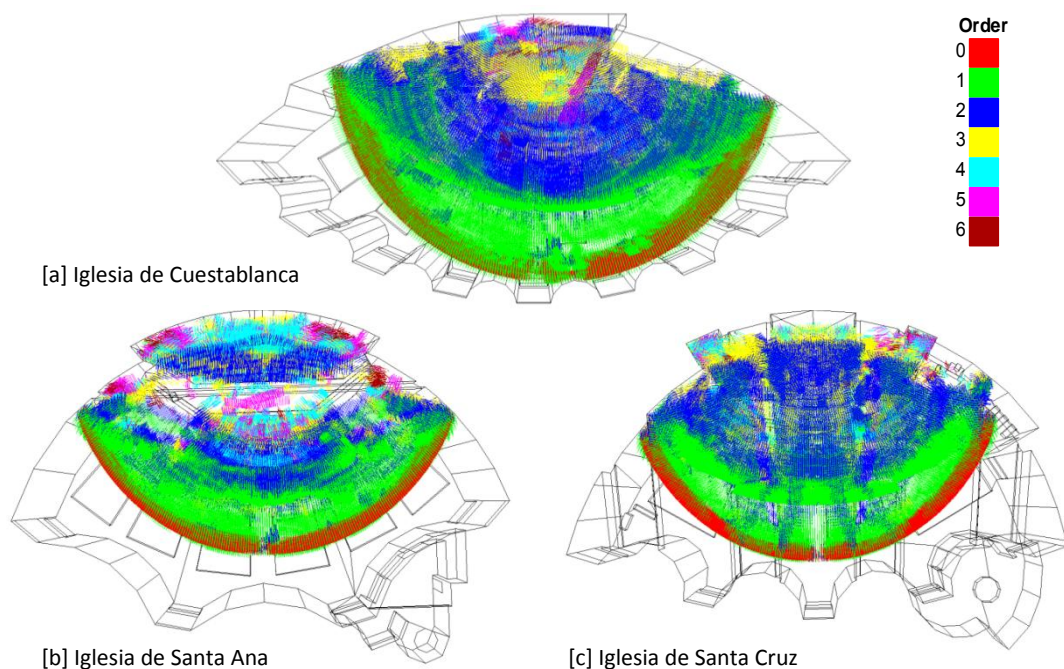


Figura 7. Trazado de rayos sonoros en los primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Vista en planta. Colores según orden de reflexión.

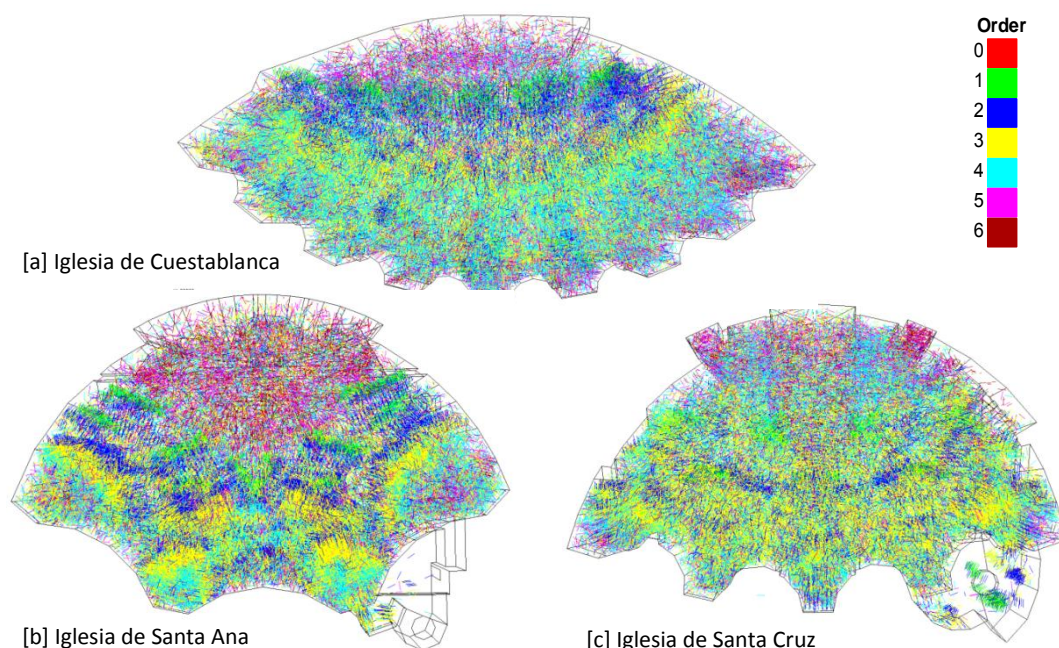


Figura 8. Trazado de rayos sonoros en los primeros 80 ms incluyendo reflexiones difusas, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Vista en planta. Colores según orden de reflexión.

En la figura 7 podemos ver que, durante los primeros 40 ms, el frente de ondas avanza hacia la audiencia, generando reflexiones especulares que involucran a la pared del altar, suelo y techo principalmente. La existencia del lucernario en la iglesia de Santa Ana provoca una pérdida energética en éste, que no tiene lugar de una forma tan acusada en las otras dos iglesias simuladas.

En la figura 8, se ha extendido el intervalo temporal hasta los 80 ms, incluyendo además las reflexiones difusas. En todos los casos se puede apreciar la simetría de la energía sonora sobre la audiencia. La disposición asamblearia provoca una mayor concentración de reflexiones especulares sobre el techo, zona de audiencia y la pared del fondo que contiene los *muros dispersivos*. A este respecto, cabe destacar, que la absorción sonora del techo de la iglesia de Cuestablanca es prácticamente el doble que la de las otras dos, lo que explica la menor reverberación encontrada en dicha iglesia. La capacidad de reflexión y dispersión de las ondas sonoras de dichos muros se observa beneficiosa para la audiencia de las últimas filas de bancos.

5. CONCLUSIONES

Estas primeras iglesias de Fisac, posteriores al Concilio Vaticano II, integran el interés de su autor por las cuestiones acústicas, con su investigación en la precepción del espacio sagrado y en las posibilidades estructurales del hormigón. Intentó lograr la bondad acústica empleando dos herramientas: la primera, el diseño de la geometría de la planta, con forma asamblearia para facilitar la visión y acortar la distancia entre fuente y receptores; y la segunda, las formas arquitectónicas, donde el tratamiento sinuoso, con curvas convexas, de la pared de fondo evitaba las concentraciones acústicas.

Las simulaciones del campo sonoro de cada iglesia reflejan que consiguió recintos eclesiales difusos, con distribución sonora homogénea y buena impresión espacial. Sin embargo, la escasa absorción sonora de los materiales de revestimiento, origina elevados tiempos de reverberación y, como consecuencia, una deficiente inteligibilidad de la palabra y claridad musical.

Con la visualización de los frentes de ondas sonoras, se aprecia que las superficies o elementos que más influyen en el comportamiento acústico de estas iglesias asamblearias, son el techo y la pared de fondo formada por los *muros dispersivos*, cuya capacidad de reflexión y dispersión de las ondas sonoras, se observa beneficiosa para la audiencia de las últimas filas de bancos.

6. REFERENCIAS

- [1] **Bueno, A.M., León, A.L., y Galindo, M. (2012).** Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Archives of Acoustics*, 37(4), p. 435-446.
- [2] **Bueno, A.M.; León, A.L.; Galindo, M. (2011).** La acústica en las iglesias postconciliares de Miguel Fisac: Santa Ana de Moratalaz. *Tecniacústica 2011 - 42º Congreso Español de Acústica*, Cáceres, 26-28 de octubre de 2011.
- [3] **Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009).** Acoustic simulations of mudejar-gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1207-1218.
- [4] **Bueno, A.M.; León, A.L.; Galindo, M. (2011).** Simulación acústica de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz. *ISVA 2011 - Seminario Internacional de Acústica Virtual*, Valencia, 24-25 de noviembre de 2011.
- [5] **UNE-EN ISO 3382-1:2010.** Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.