

PREDICCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN LAS IGLESIAS JESUÍTICAS DE CÓRDOBA Y SAN IGNACIO MINÍ.

Leandra Abadía 1

RESUMEN

A lo largo de lo que hoy es el territorio de la República Argentina, se establecieron durante el período de dominación hispánica, colonias fundadas y construidas por sacerdotes jesuitas, con el objetivo de “evangelizar” a las poblaciones nativas. Estas colonias durante muchos años constituyeron centros de producción y de cultura que se irradiaba al resto del territorio. Los sacerdotes se apoyaban en la prédica y aprendían los lenguajes locales a través de los cuales se comunicaban. Su preocupación por la comprensión de las palabras, y a través de ellas del evangelio, se manifiesta en los templos que construyeron. Esta investigación analiza la influencia de este pensamiento trasladado a la acústica de las iglesias de las colonias, evaluando los parámetros que determinan la comprensión de las palabras y la aptitud de cada una de las iglesias para el canto y la música religiosa. En aquellos casos en que los templos no llegaron completos hasta nuestros días, se recurrió al modelado y a la auralización para reconstruir el sonido en el interior de las iglesias, y recuperar así el patrimonio cultural intangible.

PALABRAS CLAVE

Reverberación; Absorción Del Sonido; Modelización Y Auralización.

PREDICTION OF ACOUSTICS PARAMETERS IN JESUIT CHURCHES IN CORDOBA AND SAN IGNACIO MINI.

ABSTRACT

Throughout what is now the territory of Argentina they were settled, during the period of Spanish domination, colonies founded and built by Jesuit priests, in order to "evangelize" the natives. For many years these colonies were centers of production and culture that spread to the rest of the territory. The priests preached and learned local languages through which they communicated. His concern for the understanding of speech, and through them it is manifested in the temples they built. This research analyzes the influence of this thought, translated to the churches acoustics in the colonies, evaluating the parameters that determine the understanding of speech; and the ability of each of the churches to sing religious music. In those cases where the temples fell apart or part of it, modeling and auralization was used to reconstruct the sound inside the churches and recover the intangible cultural heritage.

KEYWORDS:

Ways of Living; Project Processes; Domestic Space

1. Arquitecta, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño- FAUD.
 Doctora en Ingeniería Acústica. Universidad Politécnica de Madrid - UPM.
 Vice Directora del Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL) FAUD – UNC.
 Profesora Adjunta del Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas –CIAL- FAUD- UNC.
 Profesora asistente de la cátedra de Instalaciones IA. FAUD- UNC.

1. Introducción

A mediados del siglo IV, cuando se reconoce al cristianismo como religión oficial del imperio romano, surge una nueva tipología destinada a albergar a los fieles cristianos en su interior: la Iglesia. Estos espacios destinados al culto, están considerados como espacios especiales donde las celebraciones litúrgicas implican la participación comunitaria de manera plena.

Las características acústicas de los recintos religiosos se ven condicionadas por la arquitectura, la que a su vez tiene relación con el lugar y la época donde fueron construidas, así como por la religión a la que pertenecen. Los edificios destinados al culto se constituyen en espacios con características acústicas especiales, ya que en ellos deben convivir la palabra y la música.

Estos espacios deben compatibilizar una buena inteligibilidad para el sermón y una correcta percepción de la música, por lo que ambos aspectos requieren de características acústicas adecuadas. Son espacios complejos, muy reverberantes, de gran volumen, constituidos por materiales poco absorbentes. La existencia de elementos arquitectónicos tales como capillas, molduras, pilastras genera una importante difusión del sonido.

Las iglesias Paleocristianas poseían planta longitudinal en forma de cruz con cubierta de madera y sistema estructural adintelado, en donde la única parte abovedada era el abside. Los techos no muy altos y grandes muros ciegos, se comportaban acústicamente mejor que las iglesias medievales. En el período románico se utilizaron superficies de tipo abovedadas generándose de este modo superficies focalizadoras del sonido y las construcciones de madera fueron reemplazadas por superficies pétreas más resistentes al fuego. (Sendra y Navarro, 1996).

En las catedrales góticas, los espacios, de importantes proporciones y alturas, así como el uso de superficies abovedadas, generaban importantes tiempos de reverberación y focalizaciones del sonido. Con la incorporación de capillas laterales, se favoreció a la absorción del sonido en bajas frecuencias. La importante ornamentación de dichas capillas favorecía a la difusión del sonido.

Las iglesias Renacentistas mejoraron la acústica al poseer mejores proporciones que las catedrales góticas, utilizando madera en las superficies de techos, sin la presencia de grandes superficies reflectantes y bóveda en las capillas laterales y cúpula. En las iglesias barrocas la importante ornamentación que presentan sus superficies favorece a la difusión del sonido. Esta ornamentación está presente en la mayoría de los elementos componentes de la arquitectura como pilastras, dinteles, capiteles y otros ornamentos de importancia.

El cambio importante sobre el problema acústico en las iglesias tuvo lugar en la segunda mitad del Siglo XVI cuando órdenes religiosas, tras la celebración del Concilio de Trento y con clara vocación reformadora, lo plantearon para mejorar la inteligibilidad de palabra en la predicación. La inteligibilidad del texto, incluso de la música fue una de las razones fundamentales de la reforma (Sendra y Navarro 1996). De todas las órdenes religiosas, los jesuitas fueron quienes mayor importancia le dieron a la acústica de sus iglesias o, al menos, de quienes más documentos se conocen que acreditan esa preocupación.

Para la orden jesuita la colonización en América significó un gran desafío, lo que permitió que la formación europea de la orden se trasladara a todas las manifestaciones de vida, tanto en lo cultural como así también en las costumbres. La influencia barroca europea se manifestó en la arquitectura, en la literatura, la música y la filosofía. Con respecto a la arquitectura, la formación de los jesuitas jugó un papel significativo en las construcciones, con el aporte de la mano de obra local que dejó sus huellas en las características de tipo constructivas y decorativas, siendo el estudio acústico de los mismos un importante aporte al Patrimonio del legado Jesuita.

Las iglesias jesuíticas de la ciudad de Córdoba, conjuntamente con la Iglesia San Ignacio Miní ubicada en la provincia de Misiones, constituyen uno de los iconos más importantes de la cultura patrimonial de la República

Argentina. El conocimiento por parte de los jesuitas de las técnicas constructivas y formales derivadas de la formación barroca europea, se ve reflejada en los templos, donde se verifica en el lenguaje y en las soluciones estructurales el profundo conocimiento técnico de la orden.

La complejidad de este tipo de edificios justifica la utilización de distintas técnicas para la evaluación del comportamiento acústico de cada espacio que van, desde la cuantificación numérica por medio de la obtención de parámetros acústicos, la predicción que permite corroborar el comportamiento acústico frente a diferentes situaciones (Zamarreño et al, 2011) y obtener resultados similares a los comportamientos acústicos reales, así como el estudio subjetivo utilizando encuestas a sujetos que posibiliten la asociación de parámetros objetivos y subjetivos para evaluar la respuesta de la gente acerca de las condiciones acústicas de los templos (Jiménez Dianderas, 2010) (Barrio Mora, 2008).

Todas las iglesias jesuíticas de Córdoba poseen planta en forma de cruz latina, cubierta con bóveda de cañón corrido con crucero y cúpula. Los interiores poseen ricas decoraciones y retablos de madera dorados. En la Iglesia San Ignacio Miní el techo era a dos aguas con cabreada de madera cubierta de tejas. En esta iglesia se utilizó el sistema par y nudillo, lo que permitió desplazar las columnas centrales, que tenían como función estructural sostener las vigas cumbreiras del techo hacia los laterales formando dos hileras de columnas y conformando de este modo tres naves. En las figuras 1 y 2 se muestran las plantas y perspectivas de cada una de las iglesias Jesuíticas de Córdoba y San Ignacio Mini.

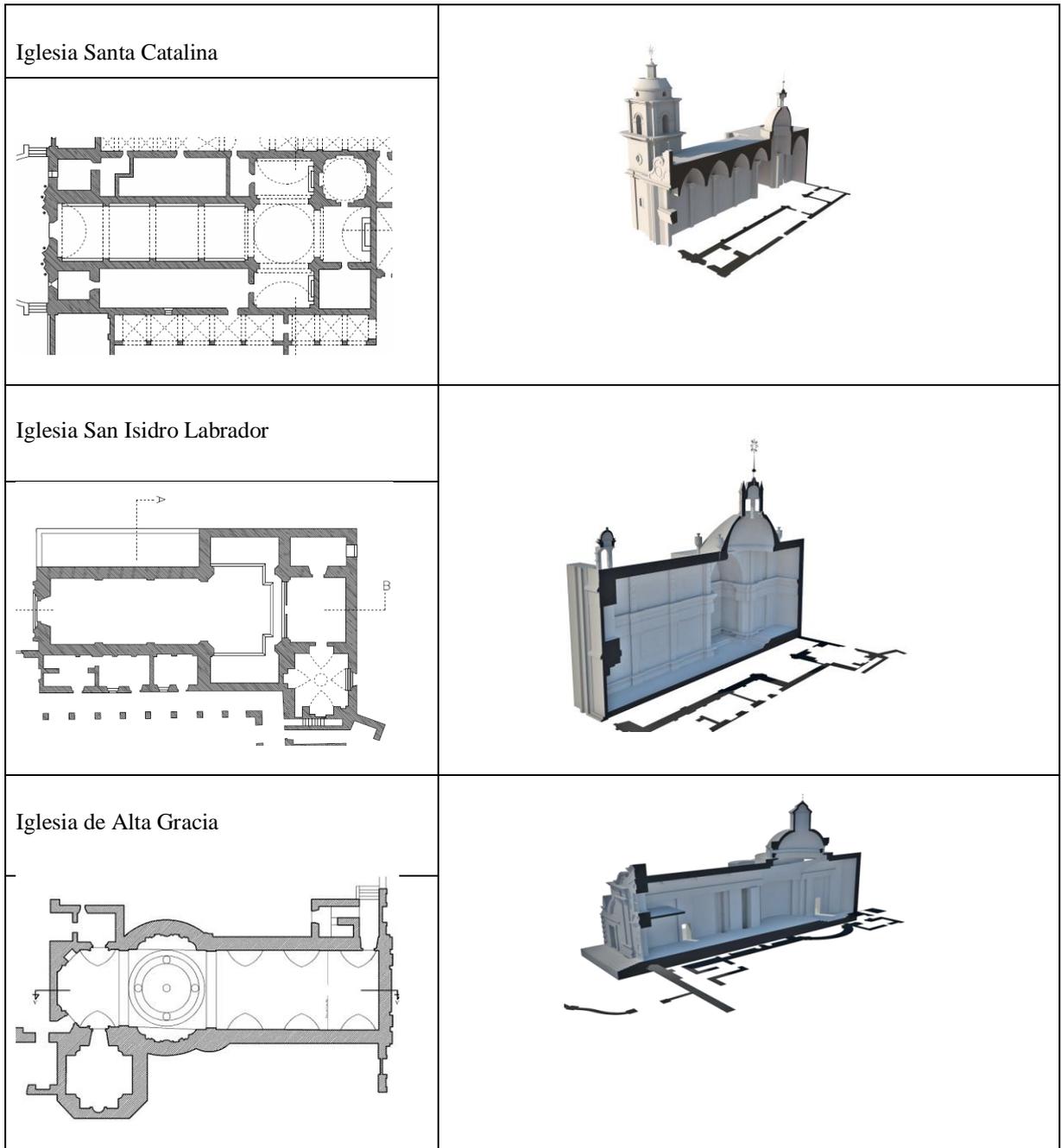


Figura 1. Plantas y perspectiva de las iglesias Santa Catalina, San Isidro Labrador y Alta Gracia. Fuente: elaboración propia.

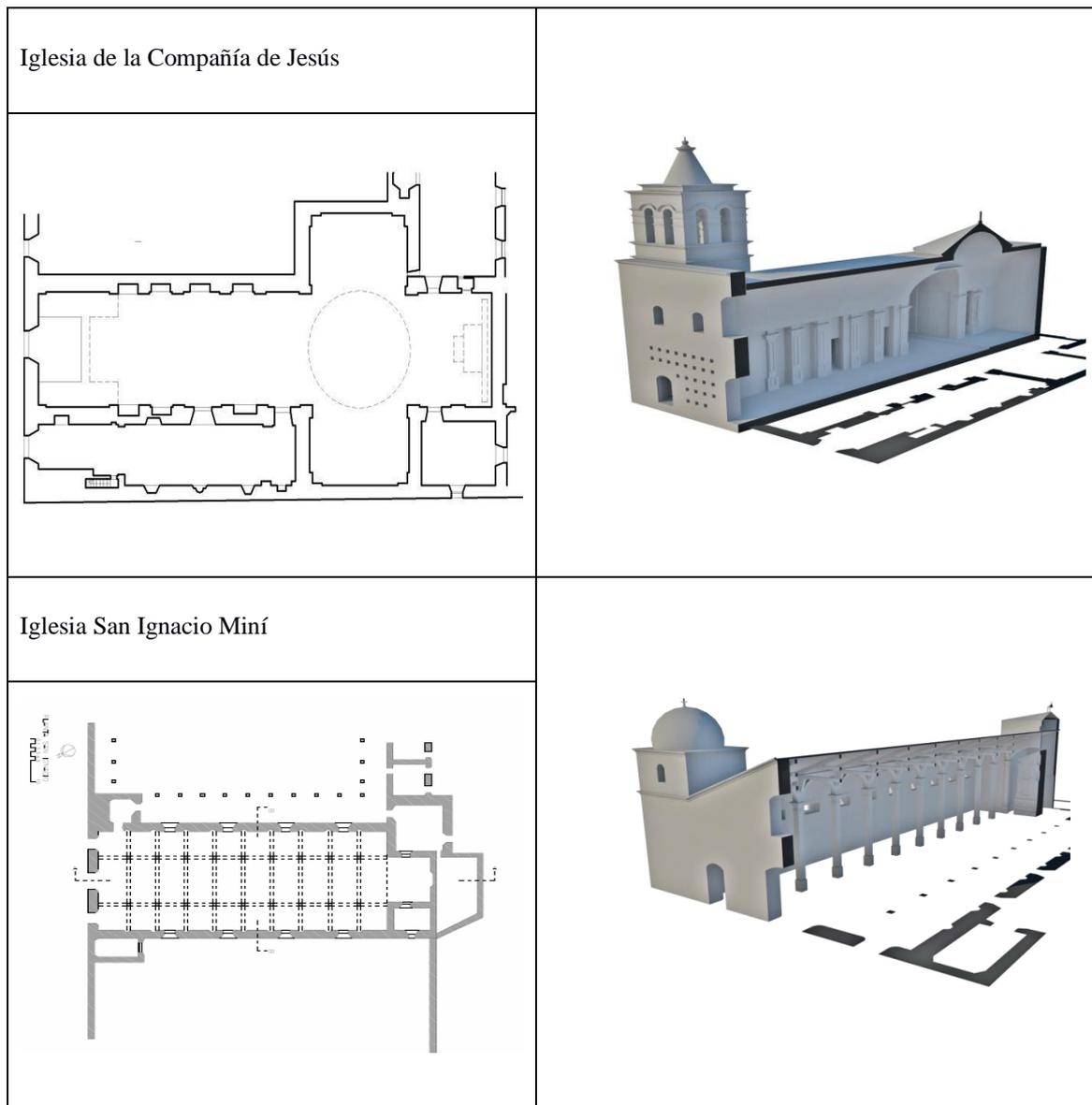


Figura 2. Plantas y perspectiva de la Iglesia de la Compañía de Jesús y San Ignacio Miní. Fuente: elaboración propia.

2. Metodología de Análisis

La acústica en los lugares de culto, y en particular en las iglesias, ha adquirido importancia en los últimos años (Martellota et al., 2009). Se han estudiado acústicamente los espacios religiosos desde el año 1953 donde Raes y Sacerdote analizaron el comportamiento acústico de dos basílicas romanas. (Raes y Sacerdote, 1953). Desde entonces varios investigadores se han abocado a estudiar el conocimiento de la propagación del sonido en el interior de estas tipologías con características de gran complejidad espacial. En los diversos estudios se consideraron relaciones entre las mediciones objetivas con las características arquitectónicas, los estilos

arquitectónicos, así como también con los juicios subjetivos (Carvalho, 1994), (Carvalho et al.,1997) (Cirilo, 1999).

Las diferencias entre los requisitos acústicos para la música y la palabra llevan a considerar parámetros acústicos objetivos determinados para la evaluación de estos recintos. La valoración de la calidad acústica de un recinto la hace el oyente mediante la percepción final, por lo que, a lo largo del tiempo se trataron de encontrar parámetros acústicos que posibiliten la relación con las valoraciones subjetivas (Ottobre, 2006). Parte de esta investigación está orientada a articular parámetros objetivos con subjetivos mediante la aplicación de encuestas.

Los parámetros objetivos seleccionados para la evaluación cuantitativa son aquellos que permiten sintetizar las propiedades acústicas relacionadas con la música y la palabra y comparar los valores con las preferencias subjetivas a través de encuestas de opinión (Beranek, 2003), y aquellos que posibilitan medir la proporción efectiva de las primeras reflexiones consideradas como índices subjetivos de la capacidad de distinción del sonido por parte del oyente.

2.1. Parámetros acústicos objetivos

2.1.1 Criterios Temporales

Tiempos de Reverberación

Los parámetros usuales destinados a caracterizar el tiempo de reverberación TR de un recinto, basados en la medición dentro de un rango dinámico inferior a los 60 dB necesarios por definición, son: el T₂₀ y el T₃₀. Para Beranek, la reverberación es, en términos subjetivos, la responsable de darle a un recinto la sensación de plenitud, siendo considerada de este modo de vital importancia para la ejecución musical.

Tiempo de Caída inicial (EDT)

El EDT (Early Decay Time) o tiempo de caída inicial es el tiempo de reverberación que corresponde a la caída de los diez primeros milisegundos. Este indicador está más relacionado con la impresión subjetiva de la reverberación de un recinto que el TR, lo que implica que una sala con EDT sustancialmente menores que TR sonará desde el punto de vista subjetivo más apagada para la música, pero más inteligible para la voz (Arau, 1999). Según las referencias bibliográficas (Carrión Isbert, 2000), (Arau 1999) el EDT_{mid} correspondiente a las frecuencias centrales debería ser aproximadamente igual a T_{mid} en el caso de la música. En el caso de palabra se considera un valor comprendido entre $0,8 < EDT_{mid} < 1$.

Índice de Brillo – IB

El brillo depende de la reverberación en las frecuencias altas, e indica si un sonido es claro y rico en armónicos. En una sala brillante los agudos se destacan con nitidez sobre el fondo de los sonidos graves (Ottobre, 2006). El brillo de una sala depende fundamentalmente de la relación entre el valor medio de los tiempos de reverberación a frecuencias altas (2000 Hz y 4000 Hz) y el valor medio de los tiempos correspondientes a frecuencias medias. Las referencias indican un valor de IB recomendando comprendido entre 0.8 y 1.

Índice de Calidez – IC

El índice de calidez representa la riqueza en bajas frecuencias. Un sonido cálido es aquel que está relleno por la reverberación a bajas frecuencias, particularmente en las bandas de 125 Hz y 250 Hz. Como medida objetiva de la calidez se utiliza la relación entre el valor medio del tiempo de reverberación a frecuencias graves (125 Hz a 250Hz) y el valor medio del tiempo de reverberación en frecuencias medias (500 Hz y 1000 Hz). Para un $T_{mid} = 1,5$ seg se puede considerar (Carrión Isbert, 2000) un valor de IC adecuado comprendido entre 1.1 y 1,45.

2.1.2 Criterios energéticos

Índice de Definición D50

Se conoce como la relación entre la energía recibida en los primeros 50 ms a partir de la emisión del sonido directo y la energía total. Se correlaciona con la inteligibilidad de la palabra (Ottobre, 2006). Un recinto con un Índice de Definición bajo se percibe como poco íntimo y normalmente esto se debe a que el tiempo de reverberación es excesivo, es decir que el recinto es muy vivo. Los valores representativos de la definición para frecuencias medias (500 y 1000Hz) dependen del destino. Según los criterios tomados como referencia para música y palabra el valor de D_{50} debería estar comprendido entre el 50 y el 65%.

Índice de Claridad C80

Un valor de C_{80} alto significa que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, lo que implica que el sonido es muy claro. Este índice es la relación logarítmica entre la energía inicial en los primeros 80 ms y la superior a ese tiempo. En la bibliografía existe bastante disparidad en relación a los valores de C_{80} a tomar como referencia. Como criterio general amplio se puede adoptar para música y palabra un entorno aconsejado de $-4 < C_{80} < 0$ dB (Beranek, 2003).

Otras consideraciones acústicas

La audiencia ejerce una absorción importante en espacios muy reverberantes, lo que implica una disminución en el tiempo de reverberación del local. En el caso de las Iglesias el valor de esta reducción depende fundamentalmente del volumen (Carvalho, 2001). La influencia de la ocupación está dada fundamentalmente en la inteligibilidad de la palabra, aunque la presencia de público también genera aumento del ruido de fondo creado por la charla de las personas, entradas y salidas al local.

Las iglesias católicas y en particular las jesuíticas poseen un volumen por persona importante que alcanza entre los 8 y 10 m³ por lo que la ocupación en ellas es de gran importancia, si se comparan con iglesias más acotadas en relación a sus dimensiones, lo que implica una disminución en el volumen por persona mejorando de este modo la inteligibilidad (Carvalho, 2001).

Son de importancia, además, las características superficiales que poseen los materiales con que se construyen las superficies envolventes de un recinto, convirtiéndose en planos absorbentes o reflectantes del sonido según sea el coeficiente de absorción del material. Sin embargo, es necesario introducir dos matizaciones, la primera es la modificación que la absorción del aire produce en grandes espacios de importantes volúmenes como las iglesias y la segunda el comportamiento de espacios acoplados como es el caso de la existencia de capillas laterales o estructuras espaciales complejas.

3. Mediciones acústicas

Las mediciones fueron realizadas con los recintos totalmente vacíos. Para medir el tiempo de reverberación se utilizó el método impulsivo, que se lleva a cabo en forma automática. El instrumental utilizado fue un medidor de nivel sonoro marca Brüel & Kjaer, modelo 2250 equipado con software para medición de tiempo de reverberación marca Brüel & Kjaer, modelo BZ7227 versión 2.0.4. Paralelamente los impulsos fueron grabados para su posterior análisis siguiendo los criterios de la ISO 3382-1:2009 (UNE-EN ISO 3382, 2010).

Las mediciones en todas las iglesias se realizaron con la fuente ubicada en el presbiterio, en la posición del altar. Se relevaron nueve mediciones distribuidas en cada uno de los recintos y en función de las características dimensionales, las que permitieron analizar el espacio desde el punto de vista acústico. En la Figura 4 se encuentran representadas las ubicaciones típicas de los puntos de medición y de la de la fuente sonora en uno de los templos analizados.

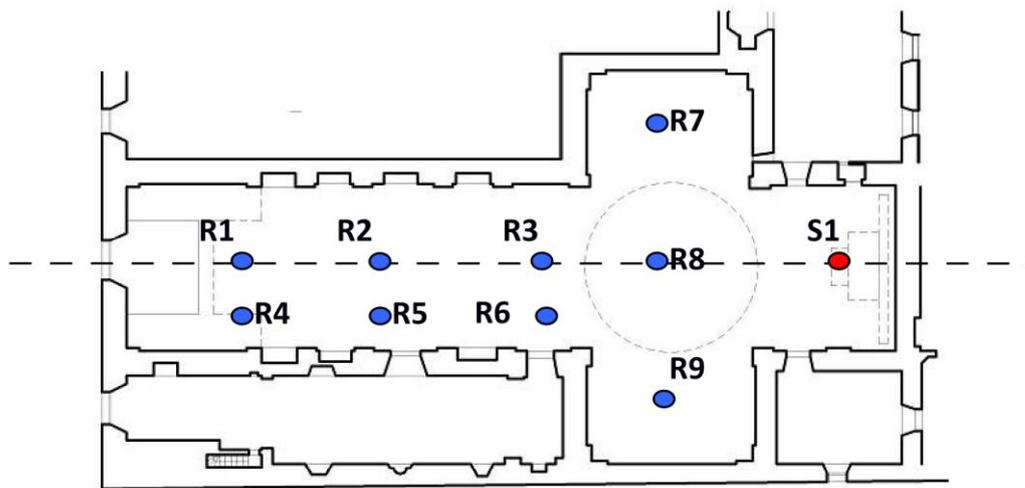


Figura 4. Ubicación de puntos de medición y fuente sonora. Fuente: elaboración propia.

4. Reducción de Parámetros Acústicos

4.1 Construcción de modelos acústicos y simulación en EASE

Mediante la utilización del software de simulación se pueden calcular los parámetros más representativos de la calidad acústica de un recinto (Recuero, 1999). Para la evaluación de la calidad acústica de las Iglesias se empleó el programa de simulación EASE el que permite calcular todos los parámetros objetivos estándar que definen el comportamiento acústico de cualquier tipo de recinto. La construcción del modelo a analizar puede realizarse mediante la utilización de los programas CAD de arquitectura existentes o construyéndolos en base a las herramientas que proporciona el programa. Los datos a introducir en el programa deberán ser lo más numerosos posible a los efectos de obtener resultados cercanos a la realidad.

La información relativa a las características de absorción y difusión de los materiales constructivos utilizados o existentes, como acabados del recinto que es objeto de estudio, se pueden extraer de una extensa base de datos

existentes en el programa. Una vez realizado el modelo arquitectónico del recinto a analizar el programa calcula los parámetros representativos de la calidad acústica del mismo, posibilitando verificar si se hallan dentro de los valores recomendados (valoración objetiva).

La construcción del modelo tridimensional se realiza a partir de disponer las piezas gráficas necesarias tales como plantas, cortes, vistas, a los efectos de construir los planos límites de cada espacio en estudio. Se deben dibujar los vértices, los que tendrán coordenadas espaciales a partir de un origen convencional. Por cada punto se deberán ingresar tres coordenadas. Los autores recomiendan realizar una tabla donde vayan volcándose las coordenadas de los vértices que se hayan elegido, y luego pasarlas al programa. Hecho esto se obtendrá un entramado de puntos que se vincularán formando caras. En la construcción de cada iglesia mediante el uso del programa, se determinó el plano de audiencia y la ubicación del altavoz en correspondencia con la posición del sacerdote en el altar. Las iglesias estudiadas acústicamente fueron representadas en el software de simulación con la mayor precisión y niveles de detalles.

El programa permite dibujar las caras a partir de la unión de vértices. Se computa la absorción sonora proporcionada por el suelo, techo y paredes considerando los coeficientes de absorción de las diferentes superficies permitiendo obtener de este modo resultado de tiempo de reverberación estadístico de Sabine o Eyring el que está dado por tercios de octava. Es de suma importancia considerar de la manera más aproximada posible las características superficiales de las envolventes, ubicación de audiencia, posición de la fuente, así como todos los aspectos formales y constructivos del recinto.

En las iglesias jesuíticas de Córdoba, Compañía de Jesús, Santa Catalina, San Isidro Labrador y Alta Gracia, se realizó el relevamiento acústico objetivo y las simulaciones de cada recinto, lo que permitió comparar los resultados obtenidos entre la medición y la simulación. La figura 5 muestra la modelización de la Iglesia de la Compañía de Jesús en Córdoba.

En la Iglesia San Ignacio Mini, actualmente en ruinas, la simulación permitió obtener los datos necesarios para la caracterización acústica de un templo que ya no existe. Se procedió a la auralización de la Iglesia San Ignacio Miní lo que posibilitó conocer la respuesta impulsiva del recinto y conseguir un espacio realista percibiendo el sonido en el interior como si se estuviera en épocas pasadas.

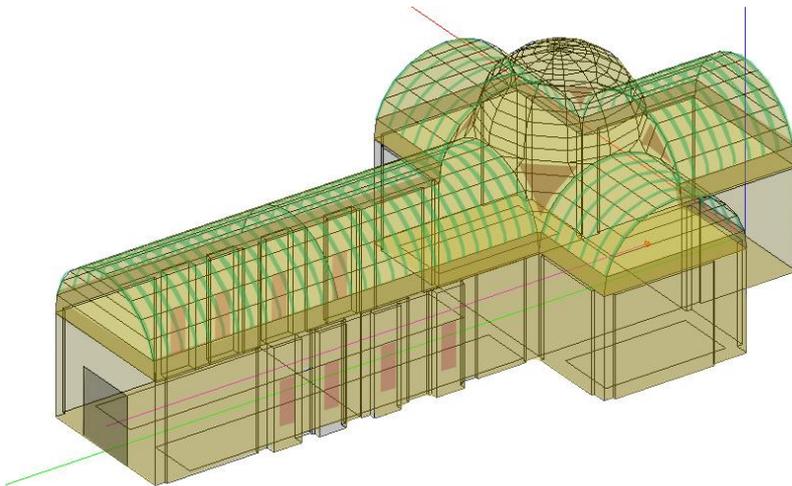


Figura 5. Modelización de la iglesia de la Compañía de Jesús. Fuente: elaboración propia.

4.1. Estudio Subjetivo

La evaluación subjetiva de espacios religiosos, ha demostrado ser un elemento sólido para la determinación de la calidad acústica de los mismos, ya que es de gran valor la opinión que aportan las personas que presencian distintos tipos de representaciones en espacios aptos para la música y la palabra (Barron, 1988), (Farina, 2001).

La encuesta que se utilizó basa su estructura y los cuestionarios en formatos de encuestas ya diseñados (Ottobre, 2006). En la elaboración de los cuestionarios se privilegió la búsqueda y fácil asociación entre parámetros acústicos y psicoacústicos. Se formularon preguntas que tuvieron en cuenta los siguientes parámetros subjetivos: “Reverberación”, “Volumen”, “Claridad”, “Comprensión”, “Espacialidad” e “Impresión General”, y se consideraron cualidades para cada parámetro subjetivo. Así para la reverberación se solicitó evaluarla entre “inadecuada-adeuada”, el volumen “alto- bajo”, la Claridad “empastado- claro”, la Comprensión “muy buena-pobre”, la Espacialidad “amplia- estrecha” y la Impresión General “buena- mala”.

Los parámetros objetivos simulados con público fueron el tiempo de reverberación (TR), Índice de Claridad (C_{80}) e Índice de Definición (C_{50}). Mediante el procedimiento de cálculo adoptado se generó una matriz de datos objetivos y subjetivos, que relaciona dichos parámetros, en donde se vuelca la interrelación entre los dos grupos de variables subjetivos y objetivos denominado r^2 , lo que permite obtener una tendencia de todos los espacios estudiados acústicamente.

Las encuestas y mediciones se realizaron en las cuatro Iglesias Jesuíticas de Córdoba a los fines de obtener una tendencia en relación a si los recintos presentan una mala o buena acústica para las personas encuestadas. Se adoptó una hoja de cálculo (Ottobre, 2006) en la cual, mediante la función estadística descriptiva se obtuvo la media, el error y la desviación estándar a los fines de validar los datos obtenidos. Mediante el procedimiento de cálculo adoptado se generó una matriz de datos objetivos y subjetivos que relaciona dichos parámetros, lo que permite obtener una tendencia de todos los espacios estudiados acústicamente. Se muestra la tabla utilizada para el volcado de datos correspondientes a cada una de las iglesias.

Mediante un procedimiento estadístico se estudió la relación funcional entre variables con el objeto de predecir una en función de la otra. Se compararon parámetros subjetivos con parámetros objetivos esperando encontrar una correlación entre cada uno de ellos. La función estimación lineal que utiliza el método de “mínimos cuadrados” permite calcular la interrelación entre dos conjuntos de datos, a la vez que en una matriz de datos de salida nos ofrece estadísticas adicionales (Ottobre, 2006).

La correlación de las variables determinó la calidad del ajuste. Si esa correlación es cercana o igual a 1, el ajuste será bueno y las predicciones realizadas a partir del modelo obtenido serán muy fiables, si la correlación es cercana o igual a 0, se tratará de un ajuste malo en el que las predicciones que se realicen a partir del modelo obtenido no serán fiables. En la correlación entre parámetros objetivos y subjetivos, la Reverberación se relaciona con el EDT, T_{20} Y T_{30} , así como la Claridad lo hace con el C_{80} y la Definición con el C_{50} . La espacialidad se relaciona con el Volumen y la comprensión con el T_{20} y T_{30} . Estas relaciones podrían no existir al momento de matricular los datos de las mediciones y de las encuestas.

5. Resultados

5.1. Resultados de las mediciones acústicas de las Iglesias

En las figuras 6 y 7 y 8 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en puntos interiores de los cuatro templos, en las que se observa un comportamiento similar en relación a las frecuencias, tanto en San Isidro Labrador, Alta Gracia y Santa Catalina.

Los valores de tiempo de reverberación son altos en todas las bandas de frecuencias, alcanzando la iglesia San Isidro Labrador los mayores tiempos de reverberación, siendo la diferencia muy marcada en relación a las otras iglesias analizadas. El EDT se mantiene ligeramente menor a los parámetros anteriores en toda la banda de frecuencias. Las mayores dispersiones entre los diferentes puntos medidos se dan como es lógico en las bajas frecuencias. En todas las medidas se efectuaron los correspondientes cálculos de incertidumbre.

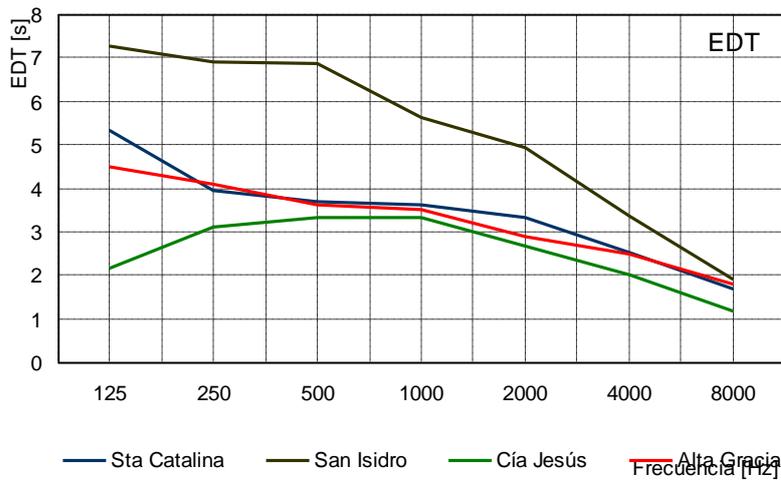


Figura 6. EDT promedio de todas las iglesias Jesuiticas de Córdoba. Fuente: elaboración propia.

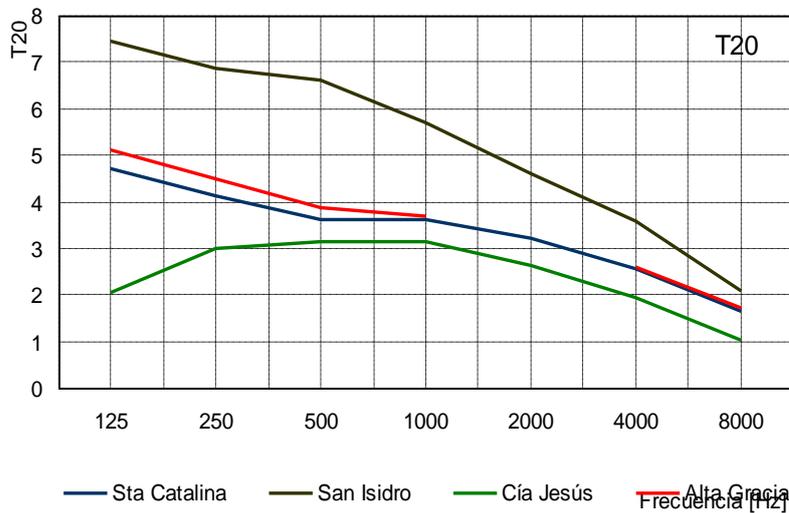


Figura 7. EDT promedio de todas las iglesias Jesuiticas de Córdoba. Fuente: elaboración propia.

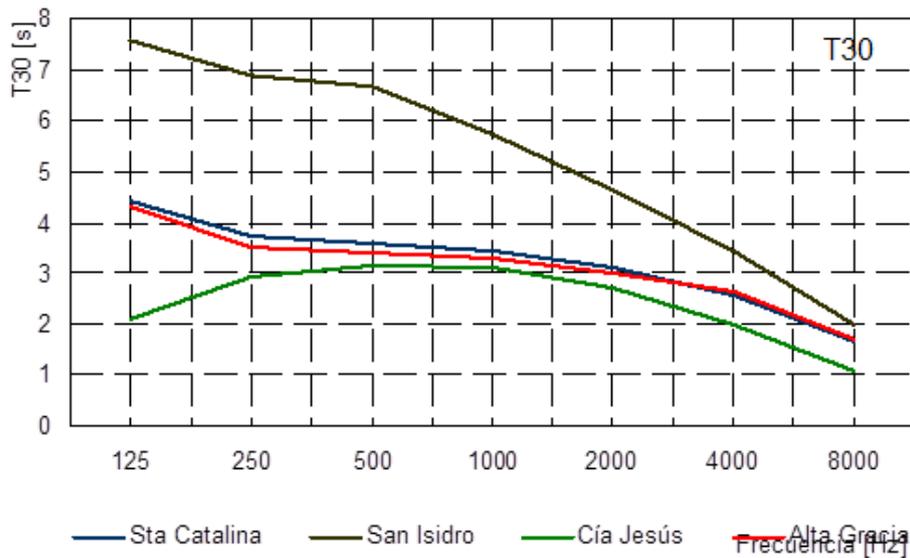


Figura 8. T₃₀ promedio de todas las iglesias Jesuiticas de Córdoba. Fuente: elaboración propia.

En la iglesia de la Compañía de Jesús se observa una importante absorción en las frecuencias bajas y altas, siendo mayor la reverberación en las frecuencias centrales. En las frecuencias altas se observa nuevamente una disminución de la reverberación, influyendo de manera importante la absorción del aire. Se midieron en cada templo los parámetros energéticos Claridad Musical C₈₀ e Índice de Definición D₅₀. En la figura 9 y 10 se muestran los resultados de los Índices D₅₀ y C₈₀ promedio de cada iglesia.

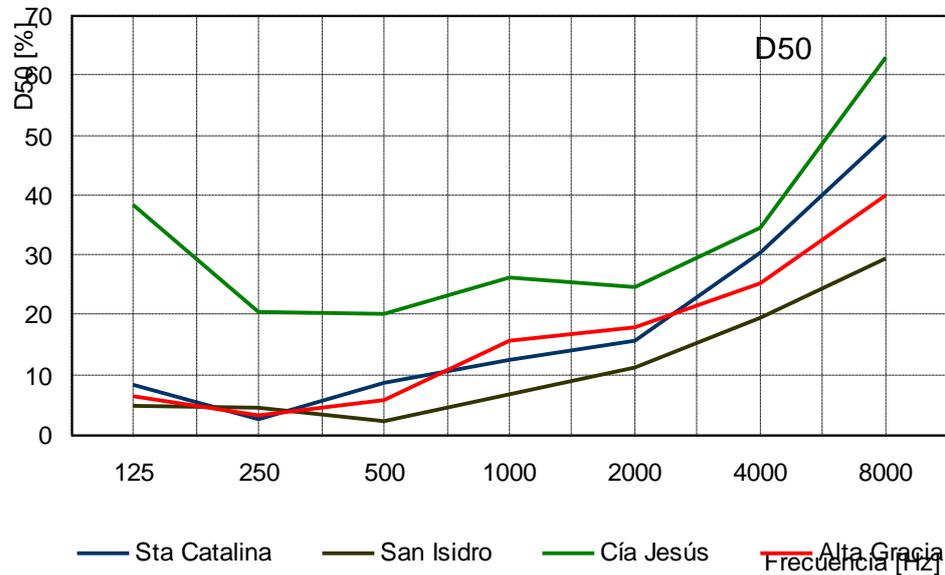


Figura 9. D₅₀ promedio de las cuatro iglesias. Fuente: elaboración propia.

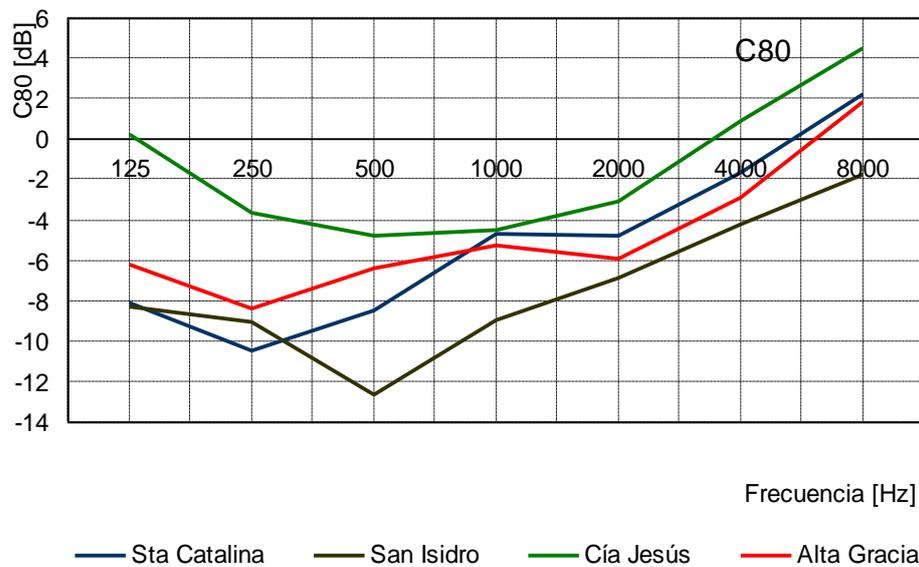


Figura 10. D_{80} promedio de las cuatro iglesias. Fuente: elaboración propia.

El índice de definición se mantiene en todos los templos por debajo de 50% para palabra y del 65% para la música. El comportamiento de la claridad musical C_{80} permanece fuera de los límites recomendados ($-2 \leq C_{80} \leq 2$ dB) en Santa Catalina, San Isidro y Alta Gracia. La Iglesia de la Compañía de Jesús es la que posee una mejor respuesta ante la claridad musical al igual que lo que sucede con la definición D_{50} .

Se observa que, en la Compañía de Jesús, los valores de claridad musical están dentro de los límites recomendados para todas las frecuencias. De este modo se puede deducir que existe para estas frecuencias una mayor cantidad de reflexiones tardías que generan de manera subjetiva un mayor placer a la percepción de los sonidos musicales. El bajo tiempo de reverberación a frecuencias elevadas es imputable a la absorción debida al aire.

5.2. Resultado de las simulaciones

Para caracterizar acústicamente las iglesias jesuíticas se tuvieron en cuenta los parámetros T_{30} , T_{20} , EDT, C_{80} y D_{50} por considerarse importantes para la evaluación del comportamiento acústico de los espacios y su relación con la música y la palabra. La simulación permitió investigar sobre la presencia del público en los lugares de culto. Se supuso la ocupación de cada espacio en un 100% considerando feligreses sentados en bancos de madera.

Para comparar los descriptores acústicos medidos y simulados de las diferentes iglesias analizadas se muestran en las figuras 11 y 12 se muestra como ejemplo para las iglesias Santa Catalina y Compañía de Jesús los tiempos de reverberación para cada banda de octava en las situaciones sin público y con público, y la comparación con los tiempos de reverberación recomendados por Knudsen. (Knudsen, Harris, 1988).

En todas las bandas se observa que el tiempo de reverberación simulado difiere en menos de un 5% de los medidos "in situ" debido al proceso iterativo de los coeficientes de absorción utilizados para el ajuste de cada

uno de los modelos. Es de importancia destacar que en todos los casos se obtuvo un acercamiento entre los valores simulados y los medidos in situ.

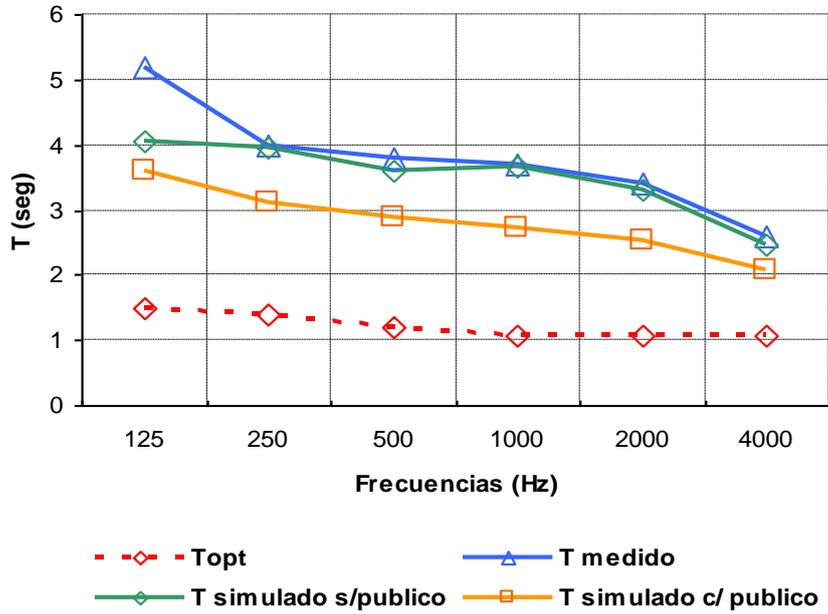


Figura 11. TR promedio de Santa Catalina con y sin público (resultado de la simulación). Fuente: elaboración propia.

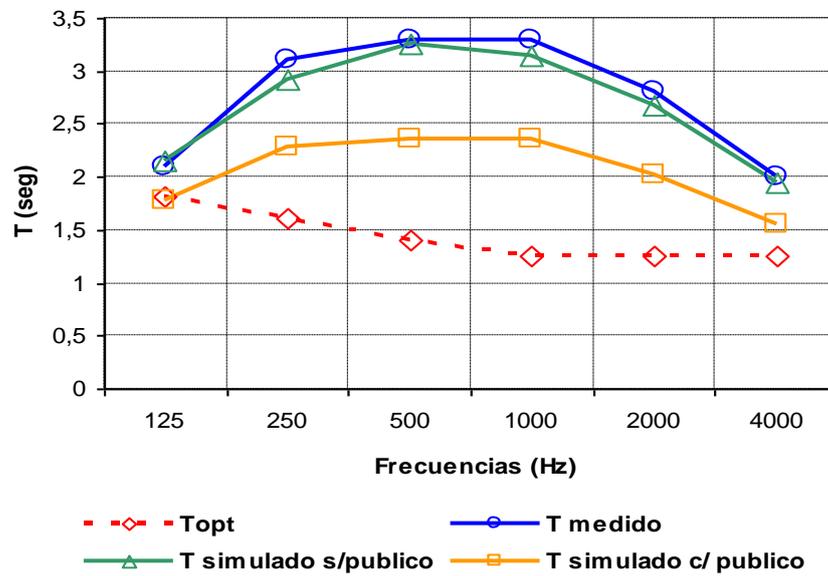


Figura 12. TR promedio de la Compañía de Jesús con y sin público (resultado de la simulación). Fuente: elaboración propia.

Se observa un importante descenso de la curva tonal en todas las frecuencias con la presencia de público que, aunque lejos de aproximarse a la curva tonal óptima mejora de manera importante las condiciones acústicas de cada uno de los recintos.

En las gráficas de las figuras 13 y 14 se muestra el cálculo del C_{50} y C_{80} de forma estadística. Se toma como valor referencial el dado por Higini Arau (Arau, 2008), que indica valores apropiados para la claridad del lenguaje $C_{50} \geq 1,50$. Se observa en la figura que en la simulación con público y para las frecuencias centrales, el índice de Claridad de la palabra está dentro de los valores apropiados. Para el índice C_{80} Arau establece que el valor medio para una sala de concierto debe situarse preferentemente entre $-2 \leq C_{80} \leq 4$ (Arau, 2008). Se observa que los valores calculados del C_{80} en la simulación con público, están dentro del rango establecido para las frecuencias bajas y centrales.

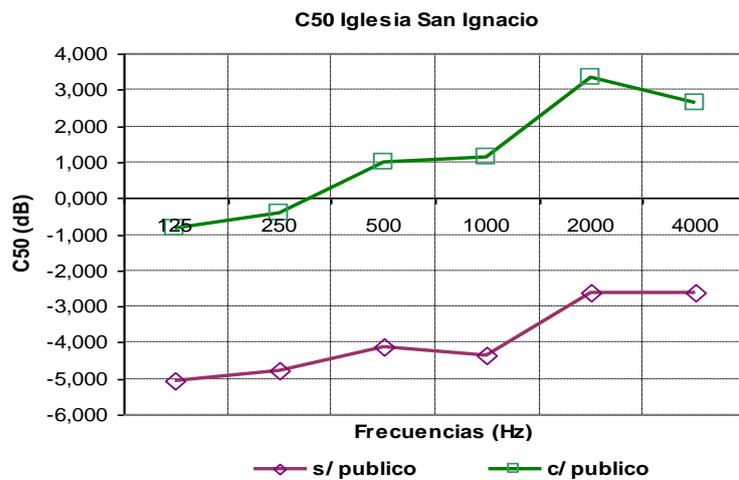


Figura 13. C_{50} promedio Iglesia San Ignacio Miní con y sin público (resultado de la simulación). Fuente: elaboración propia.

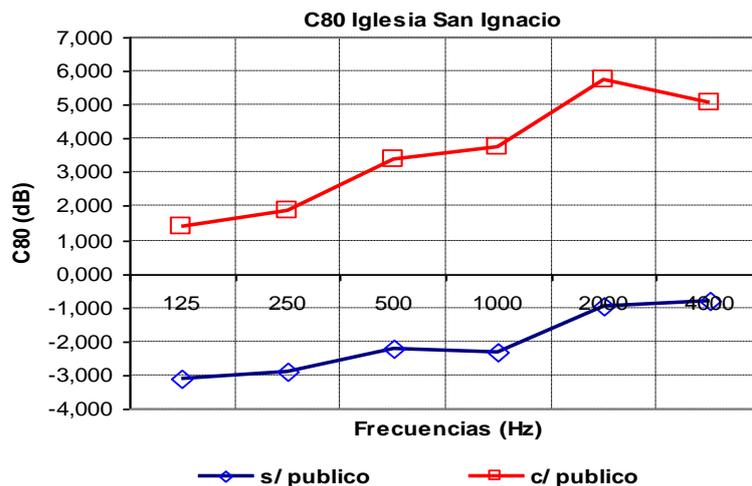


Figura 14. C_{80} promedio Iglesia San Ignacio Miní con y sin público (resultado de la simulación). Fuente: elaboración propia.

5.3. Resultado de las encuestas

Las evaluaciones subjetivas se realizaron en la Iglesia de la Compañía de Jesús, la Iglesia de Alta Gracia, la Iglesia Santa Catalina y San Isidro Labrador.

Para cada iglesia se determinó el tamaño de la muestra en base a la ocupación total de cada recinto con un error entre el 8% y el 10%. Se aplicó un muestreo de tipo casual ya que se seleccionó de manera directa o intencional a los individuos de la población. Se distribuyeron un total de 344 encuestas, con una ocupación total de los recintos, resultando válidas 300 encuestas.

En la tabla 1 se muestra los datos de salida que correlacionan los diferentes parámetros objetivos y subjetivos.

	<i>TR</i>	<i>C₈₀</i>	<i>C₅₀</i>
Reverberación	0,81	-0,25	-0,41
Volumen	0,98	-0,51	-0,68
Claridad	0,98	-0,49	-0,67
Comprensión	1,00	-0,65	-0,81
Espacialidad	0,85	-0,50	-0,64
Impresión general	0,88	-0,37	-0,54

Tabla 1. Matriz de correlaciones de datos objetivos y subjetivos de iglesias jesuíticas. Fuente: Ottobre, D, 2006

La correlación entre las escalas subjetivas y objetivas varía entre un mínimo de -0,25 y un máximo de 1,00. Las correlaciones más notables entre los resultados de los parámetros obtenidos de la simulación con público y la respuesta del usuario son las estimaciones subjetivas entre el TR y todos los parámetros subjetivos, la claridad musical con el Índice de Claridad C_{80} , la comprensión con el índice de comprensión C_{50} y con el índice de claridad C_{80} .

Existe una muy buena correlación entre la comprensión con el tiempo de reverberación y con el índice de comprensión C_{50} . Es necesario un mayor equilibrio entre la claridad musical con la Impresión general y la reverberación. Existen importantes vinculaciones entre la Claridad con el TR y el C_{50} y entre el volumen con C_{50} . La mayor correlación de la espacialidad se da con el TR.

5.4. Auralización de San Ignacio Mini

A partir de la documentación obtenida y en base a la bibliografía existente, se pudo reconstruir el modelo de la Iglesia Jesuítica San Ignacio Mini, ubicada en la Provincia de Misiones, dentro del territorio de la República Argentina la que, desde el año 1821 se encuentra en ruinas.

Se analizó el comportamiento acústico de la iglesia donde los datos acústicos que se obtuvieron fueron de tipo estadístico mediante la aplicación del software de simulación. El interés por obtener datos acústicos más precisos

de una Iglesia que actualmente se encuentra en ruinas, llevó a utilizar herramientas más poderosas de cálculo a través de software EASE como el método de las fuentes de imagen denominado Ray Tracing Impact por medio del cual se logró la Auralización del espacio. En la figura 15 se muestra la construcción del modelo de la Iglesia de San Ignacio en perspectiva realizado con el software de simulación EASE 4.1.

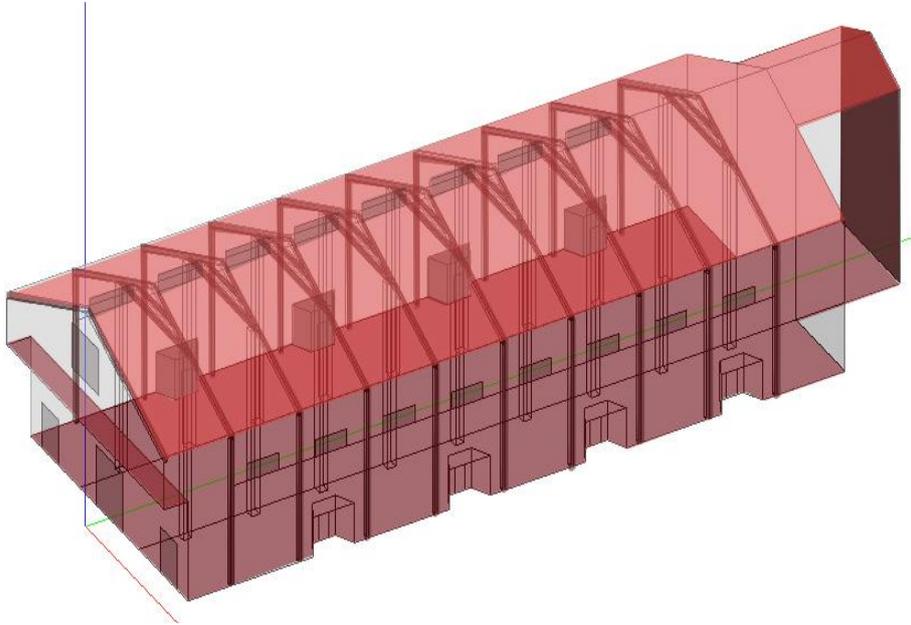


Figura 15. Perspectiva Iglesia San Ignacio Mini. Fuente: elaboración propia.

Simulación mediante el uso de Ray Tracing Impact

Ray Tracing Impact es un método geométrico de trazado de rayos que representa la propagación de la energía sonora dentro de un recinto. Este método considera la difusión de la energía cuando esta incide sobre superficies consideradas como dispersoras del sonido, siendo de gran importancia cuando los coeficientes de absorción de las superficies son bajos, ya que modifica el tiempo de reverberación del local (Recuero,2003).

Ray Tracing permite, mediante la emisión de rayos y sus reflexiones dentro del recinto, que cada rayo emitido desde la fuente sonora pueda ser analizado de manera individual, observar en que superficies del interior del espacio se ha reflejado, y determinar la energía sonora incidente y saliente posibilitando de este modo estudiar los patrones de reflexión del sonido (Ottobre, 2006). La cantidad o número de orden de reflexiones se elige de tal manera que se tenga la mayor probabilidad de obtener el máximo número de ellas. Este método requiere de un tiempo de procesamiento prolongado de cálculo pudiendo ser analizados solo los rayos que pasan por el receptor. La respuesta impulsiva dentro de un recinto posibilita la creación de reflectogramas mediante los cuales se visualiza la llegada de cada reflexión del sonido emitido y su correspondiente energía. En el reflectograma se representa la llegada del sonido directo al receptor sin considerar las características físicas del local, luego le siguen las primeras reflexiones, o reflexiones tempranas, las que se determinan por la forma y las superficies proporcionando al oyente una idea acerca de las dimensiones del espacio y de la ubicación de la fuente sonora.

Por último, están representadas las reflexiones tardías o reverberación, las que se dan como consecuencia de las múltiples reflexiones y absorciones del sonido, en donde estas se fusionan siendo compleja su identificación y permitiendo prolongar el reflectograma agregándole una cola reverberante calculada en forma estadística.

5.4.1. Resultados de las Simulaciones mediante Ray Tracing Impact

En base a la construcción del modelo, se realizó una simulación de 100.000 rayos desde el altavoz ubicado en el altar de la Iglesia, a 1,60 m sobre el nivel del mismo y con las características de sensibilidad y de directividad de la voz humana masculina.

Mediante la aplicación del trazado de rayos se obtuvo hasta el 13° orden de reflexión y se analizaron los resultados para las diferentes combinaciones fuente- receptor. En la Figura 16 se muestra el trazado de rayos que impactan en los diferentes puntos de recepción considerados en la Iglesia San Ignacio Mini.

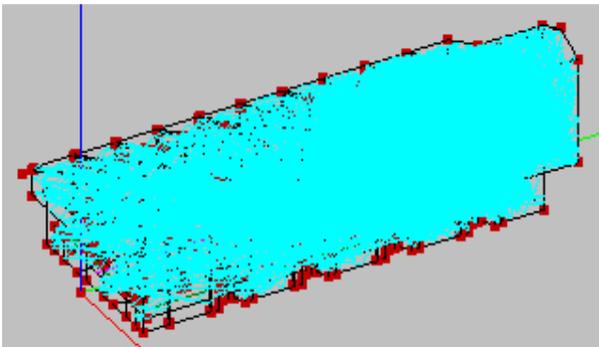


Figura 16. Trazado de rayos en el interior de la Iglesia San Ignacio Miní. Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Análisis de parámetros temporales

Se obtuvieron reflectogramas para cuatro puntos representativos de la zona de audiencia y una sola posición de fuente sonora. Los reflectogramas no son tan precisos para altos tiempos de reverberación para lo cual se hizo necesario agregar una cola reverberante que el programa calcula en forma estadística. La Figura 17 muestra algunos de los resultados para las combinaciones fuente-receptor para 1 KHz de las posiciones consideradas para el cálculo y verificación de los parámetros acústicos.

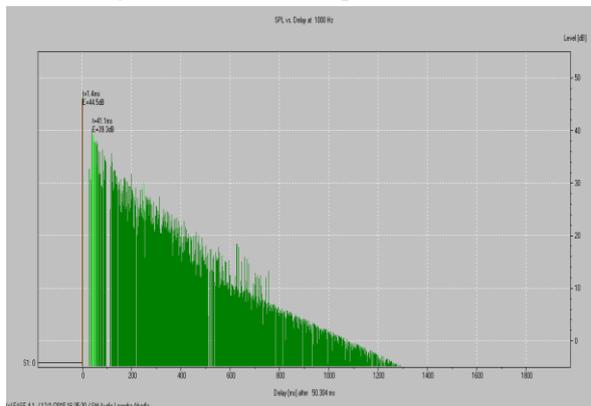


Figura 17. Reflectograma en la posición 1 con la Fuente sonora 1. Fuente: elaboración propia.

La generación de reflectogramas permitió calcular el tiempo de reverberación por la ecuación de Schroeder como otra forma de evaluación del parámetro temporal, considerado como método más preciso de predicción en las simulaciones acústicas (Schroeder, 1965), (Ottobre, 2006). En la figura 18 se observa el cálculo de los tiempos de reverberación en base a las ecuaciones de Schroeder, Sabine y Eyring.

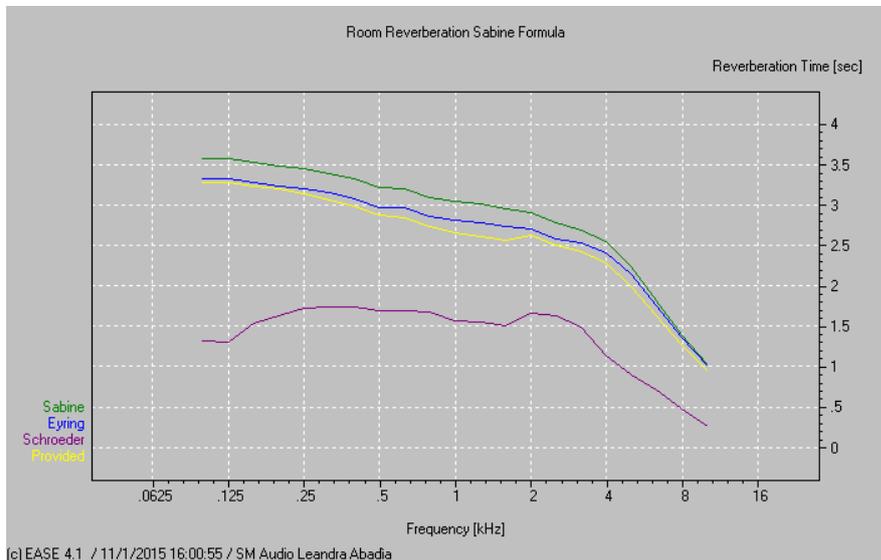


Figura 18. Cálculo de los tiempos de reverberación en base a las ecuaciones de Schroeder, Sabine y Eyring. Fuente: elaboración propia.

6. Auralización de San Ignacio Mini

La modelización de un espacio se realiza a través de técnicas de simulación que permiten la visualización y la audición de ese espacio. La recreación de situaciones anteriores posibilita conocer la respuesta impulsiva de los locales y permite conseguir espacios realistas percibiendo el sonido en el interior del recinto como si se estuviera en épocas pasadas.

La auralización tiene como finalidad simular la sensación de escuchar el sonido en una determinada posición del oyente y de la fuente dentro del recinto. Recrear acústicamente una iglesia que ya no existe es una tarea ardua y difícil, ya que las únicas herramientas con las que se cuenta son con los datos geométricos del espacio ya que se conoce muy poco acerca del comportamiento acústico de los materiales.

Las características dimensionales de la iglesia tales como la geometría y el comportamiento acústico de los materiales componentes de la iglesia, se constituyen en parámetros que influyen en la calibración o ajuste del modelo. En este caso, al tratarse de una iglesia que está en ruinas, los datos técnicos de la iglesia se obtuvieron mediante la información recibida en la visita al lugar y el comportamiento acústico de los materiales se obtuvo de la base de datos del programa por la imposibilidad de ser ensayados acústicamente. Esta información se constituyó en una dificultad para la calibración y ajuste del modelo de la Iglesia de San Ignacio Mini.

Existen varias técnicas destinadas a la auralización de un espacio, diferenciándose unas de otras en la mayor o menor dificultad que ofrece su aplicación. La técnica más utilizada actualmente para la auralización es la calculada por computadora, la que predice la respuesta impulsiva y procesa la señal para que sea audible. El programa de simulación EASE permite conocer la respuesta impulsiva binaural mediante la generación de un

archivo de sonido que posibilita la auralización a través de una señal grabada de manera preferencial en cámara anecoica, evitando de este modo la reverberación, lo que mejora notablemente la respuesta.

El punto de inicio para la auralización es obtener información sobre la respuesta impulsiva binaural en cada uno de los receptores analizados mediante la generación de un archivo BIR. Se convolucionó mediante la aplicación del auralizador EARS DE EASE y se generó un archivo de audio. La Figura 19 muestra la respuesta impulsiva binaural para la posición 2 en la zona de audiencia.

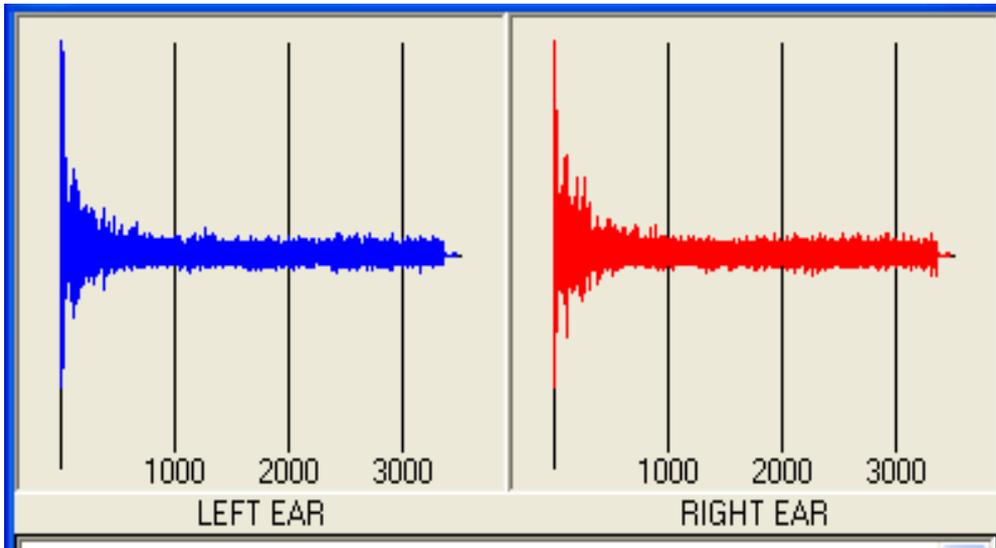


Figura 19. Respuesta impulsiva Binaural. Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

Las herramientas de análisis utilizadas en la metodología para la evaluación del comportamiento acústico de las Iglesias Jesuíticas de Córdoba y San Ignacio Miní, de gran valor Patrimonial, permitió recrear situaciones acústicas pasadas y considerar a la misma como parte del patrimonio cultural intangible propio de una cultura. La difusión del Patrimonio cultural inmaterial contribuye directamente a la valoración y conservación de las culturas locales y regionales. De este modo, se obtuvieron datos poco conocidos sobre la acústica en el interior de cada templo.

En el caso de San Ignacio Miní, la reconstrucción hipotética de la Iglesia en base a los datos que hoy se encuentran a nuestra disposición permitió, no solo recomponer las características arquitectónicas del templo, sino evaluar el comportamiento acústico del espacio arquitectónico.

La manera en que se comporta el sonido dentro de un espacio y la sensación que produce en el oyente mantiene una estrecha relación con los aspectos formales y constructivos de ese espacio. Es por ello que el registro y evaluación de los parámetros subjetivos y objetivos son considerados parte del Patrimonio cultural.

Las mediciones permitieron analizar el comportamiento acústico de las Iglesias Santa Catalina, San Isidro Labrador, Compañía de Jesús y Alta Gracia desde el punto de vista objetivo. Del análisis se observa que la Iglesia de la Compañía de Jesús es la que posee el tiempo de reverberación más bajo en todas las frecuencias, existiendo una absorción importante en las frecuencias bajas debido a la absorción que ejerce el techo de madera.

San Isidro es el espacio que posee mayor tiempo de reverberación en todas las frecuencias, existiendo una diferencia importante con Santa Catalina, Alta Gracia y Compañía de Jesús. Esto se debe a que se trata de un espacio de importante volumen y muy reverberante. Las curvas de decaimiento de los tiempos de reverberación son similares en Santa Catalina, San Isidro Labrador y Alta Gracia, siendo diferente Compañía de Jesús. Esto denota la falta de absorción que poseen las Iglesias pertenecientes a las Estancias Jesuíticas con respecto a la Compañía de Jesús.

En relación a la claridad musical se observa que, en la Compañía de Jesús, los valores están dentro del margen recomendado por Beranek, lo que denota una muy buena respuesta acústica para la música, especialmente en frecuencias medias y bajas. Asimismo, Santa Catalina y Alta Gracia poseen buena respuesta para la música en frecuencias medias y altas, quedando San Isidro fuera de los márgenes recomendados. Con respecto al Índice de definición D_{50} se observa que los valores están por debajo del 50%, lo que implica que todos los recintos analizados poseen poca intimidad acústica.

En la matriz utilizada en las encuestas se verifica una correlación global de datos que relacionan los parámetros objetivos con los subjetivos. El volumen está claramente relacionado con todos los parámetros medidos, así como la Claridad y la especialidad. Las mejores vinculaciones se dieron entre todos los parámetros objetivos y la Claridad ya que en todos los templos analizados existe una mayor cantidad de reflexiones que subjetivamente generan un mayor placer en la escucha de la interpretación musical.

La relación menos ajustada se da entre el C_{50} y la comprensión siendo este parámetro subjetivo el que menor correlación posee con todos los parámetros objetivos corroborándose de este modo la tendencia de las mediciones objetivas que denotan que el Índice de definición está fuera de los márgenes recomendados en todas las iglesias. Asimismo, la impresión general se relaciona con todos los parámetros objetivos. La Calidez se vincula a la relación entre el sonido total y las bajas frecuencias o a la relación del tiempo de reverberación entre medias y bajas frecuencias. En todos los templos analizados la calidez está dentro de los valores aconsejados.

El brillo se vinculará con la relación entre la reverberación en frecuencias medias y altas y el valor medio de los tiempos correspondientes a frecuencias medias. En todos los templos analizados el brillo está fuera de los valores recomendados.

La metodología aplicada permitió evaluar la manera en que se comporta el sonido dentro de un espacio, la sensación que produce en el oyente dicha percepción y la relación que existe entre los parámetros objetivos y subjetivos con los aspectos formales y constructivos de ese espacio.

8. Bibliografía

- Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona: CEAC.
- Arau, H. (2008). ¿Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas? *Acústica*.
- Barrio Mora, J. (2008). *Sistema de predicción de parámetros que caracterizan el campo sonoro en iglesias* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Barron, M. (1988). Subjective Study of British Symphony Concert Halls. *Acústica*, 66 (1).
- Beranek, L. (2003). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* (2a. ed.). New York (USA): Springer Science & Business Media.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Cataluña: UPC.
- Carvalho, A. P. (1994). Relationship between objective acoustical measures and architectural features in churches. In *127th Acoustical Society of America Meeting* (pp. 311–314). Cambridge, USA.
- Carvalho, A. P. (2001). Church Acoustics and Influence of Occupancy. *Building Acoustics*, 9, 29–47.
- Carvalho, A. P., Morgado, A. E., & Henrique, L. (1997). Relationship between Subjective and Objective Acoustical Measures in Churches. *Building Acoustic*, 4 (1), 1–20.
- Cirilo, E., & Martellotta, F. (2003). Acoustics of Apulian-Romanesque Churches: Correlations between Architectural and Acoustic Parameters. *Building Acoustics*, 10 (1), 55–76.
- Farina, A. (2001). Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations. *Applied Acoustics*, 62, 889.
- Jiménez Dianderas, C. (2010). *Correlación entre parámetros acústicos objetivos y características físico arquitectónicas en templos católicos del período colonial en ciudades representativas del Perú* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Knudsen, V., & Harris, C. (1988). *Acoustical Design in Architecture* (5a. ed.). New York (USA): Acoustical Society of America.
- Martellotta, F., Cirillo, E., Carbonari, A., & Ricciardi, P. (2009). Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics*, 70, 378–388.
- Ottobre, D. (2006). *Base de datos para el análisis y comparación de parámetros acústicos y psicoacústicos en teatros y salas de concierto* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Raes, A. (1953). Measurements of the Acoustical Properties of Two Roman Basilicas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 925–961.
- Recuero López, M. (1999). *Acústica arquitectónica aplicada*. Madrid (España): Paraninfo.
- Recuero López, M. (2003). *Contaminación Acústica* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, 409–412.
- Sendra, J.J. y Navarro Casas, J. (1996). El concilio de Trento y las condiciones acústicas de las iglesias. In *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 19–21). Madrid.
- UNE-EN ISO 3382 (2010).
- Zamarreño, T., Girón, S., & Galindo, M. (2011). Simulación acústica y virtualización en recintos de culto. Presented at the International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia.