45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

HORIZONTES ACÚSTICOS EN LA CATEDRAL DE TOLEDO EN PRESENCIA DE VARIAS FUENTES SONORAS

PACS no. 43.55.Ka

Ruiz Martínez, Rogelio; Pedrero González, Antonio; Iglesias Martínez, Luis; Díaz Sanchidrián, César
Grupo de investigación en Acústica Arquitectónica, ETS de Arquitectura
Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid
Tel: +34 913 364 249
Fax: +34 913 366 554
E-mail: arquilav.arquitectura@upm.es

ABSTRACT

In Toledo Cathedral were officiated daily multiple liturgical celebrations. Several took place simultaneously, reciprocally altering the acoustic conditions of the architectural spaces provided for each function.

Through a virtual acoustic model validated with in situ measurements and taking into account historical functional criteria, it has been obtained results of several magnitudes related to intelligibility for various configurations of simultaneous use. Using a geographical information system, data were integrated to evaluate the sound quality at each point with respect to different sound sources, allowing the delineation on acoustic maps of the acoustic horizon linked to each celebration.

RESUMEN

En la Catedral de Toledo se oficiaban diariamente múltiples celebraciones litúrgicas. Varias tenían lugar simultáneamente, alterando recíprocamente las condiciones acústicas de los espacios arquitectónicos destinados a cada función.

Mediante un modelo acústico virtual validado con medidas in situ y considerando criterios funcionales históricos, se han obtenido resultados de varias magnitudes relacionadas con la inteligibilidad para diversas configuraciones de uso simultáneo. Utilizando un sistema de información geográfica se han integrado los datos para evaluar la calidad acústica en cada punto respecto a las distintas fuentes sonoras, permitiendo delimitar en mapas acústicos el horizonte acústico ligado a cada celebración.

1. INTRODUCCIÓN

En el análisis acústico de los edificios se tiene en cuenta la función de sus espacios como dato inicial básico. Sin embargo en el caso de las catedrales la comprensión de su función histórica en la mayor parte de los estudios acústicos publicados es limitada. Las catedrales son mucho más que una iglesia, no tanto por su tamaño como por las funciones litúrgicas que acogen. En la Catedral de Toledo cada liturgia estaba localizada en un espacio arquitectónico específico con características acústicas acordes con su función [1]. Además el número de celebraciones era tan elevado y existían unos condicionantes tales, que casi todos los días había momentos en los que varias se realizaban simultáneamente.

La simultaneidad de emisión en presencia de múltiples fuentes sonoras se lleva estudiando al menos desde los años 50 con la descripción del efecto "*cocktail party"* (Cherry, 1953). Desde entonces este fenómeno y el directamente relacionado del enmascaramiento, se han estudiado principalmente como un problema de identificación de la fuente sonora en función de la distancia o de la discriminación selectiva de la misma. A la complejidad de la cuestión se ha respondido con la incorporación de factores como el número y características de las fuentes, su movimiento, factores visuales, divergencia espacial, reverberación, ruido de fondo, etc. [2] [3]. En el caso de los recintos de culto, los trabajos existentes que consideran varias fuentes sonoras se han centrado en el estudio de las fuentes por separado, en la simultaneidad dentro de una misma celebración o en la planificación de sistemas electroacústicos.

El planteamiento de este estudio es que a cada celebración en un espacio litúrgico se le puede asociar un 'espacio aural', lugar donde el evento sonoro puede percibirse de acuerdo a las expectativas de un determinado tipo de oyente [4] Para determinar la extensión del 'espacio aural' se establece el denominado 'horizonte acústico', definido como la máxima distancia entre el oyente y la fuente a la que el evento sonoro cumple con las expectativas mencionadas. En este trabajo se ha considerado el STI (Speech Transmission Index) como el índice básico para delimitar los espacios aurales. Como primera aproximación, por analogía con la norma ISO 3382-3 [5], para el horizonte acústico se han utilizado dos parámetros de decrecimiento espacial del STI: la distancia de distracción (r_D) y la distancia de privacidad (r_P). Se hace por tanto necesaria la descripción acústica de estas simultaneidades para una determinación suficientemente verosímil del STI. Para ello se incorpora como dato de partida el ruido ambiental, en el cual van incluidos el ruido de fondo y el ruido debido a la actividad.

El objeto de este trabajo es determinar, de acuerdo a la realidad histórica, litúrgica y funcional, cómo la presencia de varias fuentes sonoras simultáneas afecta a las condiciones acústicas de los espacios y usos correspondientes a cada una de ellas. Para ello se analizan, mediante modelos acústicos de simulación virtual validados, tres configuraciones de uso simultáneo habituales en la historia de la Catedral de Toledo, para obtener a partir de los horizontes acústicos, el espacio aural ligado a cada una de ellas.

1.1. Descripción del espacio arquitectónico

El edificio tiene cinco naves, ábside circular y capillas de distintas épocas en todo el perímetro. La nave central tiene la misma altura que el crucero y las laterales altura decreciente. La Capilla Mayor y el Coro están parcialmente delimitados en tres de sus lados por construcciones murarias, órganos, retablos, etc. y separados entre si por el crucero, constituyendo una especie de iglesia interior dentro del espacio general de la iglesia. Las capillas perimetrales tienen muy diversos tamaños y en general se encuentran comunicadas espacialmente con las naves.

Las dimensiones aproximadas sin capillas son de 108 m de largo y 54 metros de ancho. La nave central tiene 14.8 m de ancho y 31 m de alto y las laterales de 9.8 m de ancho y 19 y 12 m de alto. La estructura principal, realizada en piedra caliza, está formada por 72 bóvedas, 48 columnas interiores y 40 pilastras en los muros perimetrales, encerrando un volumen de unos

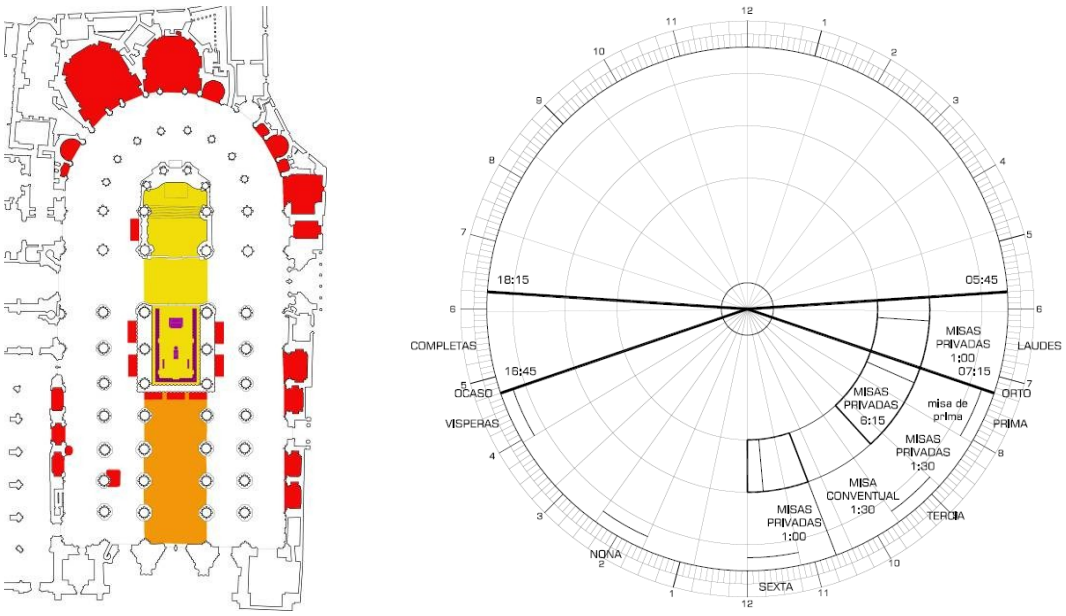
125.000 m3. Los paños de las bóvedas son de fábrica. La gran mayoría de las superficies están cubiertas con mortero de yeso de diversos acabados.

SIMULTANEIDAD EN LA CATEDRAL DE TOLEDO

Las funciones litúrgicas principales y su frecuencia en la Catedral de Toledo eran:

- Misa conventual o solemne, diariamente en el espacio Capilla Mayor-Crucero-Coro.
- Liturgia de las Horas o Divina en el Coro, celebrada en las ocho horas canónicas.
- Misas leídas u ordinarias, diarias con fieles, la más característica la del trascoro.
- Las misas de aniversario y difuntos, privadas sin fieles, en las capillas perimetrales e interiores de toda la catedral y con distinta frecuencia diaria, semanal o anual.

El total anual de misas celebradas era de más de 30.000, según las fuentes directas consultadas [6]. Durante la misa conventual diaria estaba prohibida la celebración de otras misas y los domingos y fiestas principales no se podían celebrar misas privadas. Por tanto en un día normal habría más de 100 misas diarias. Las misas se celebraban salvo excepciones muy puntuales dentro del horario solar, entre la aurora y el crepúsculo y preferentemente antes del medio día. Así, según se muestra en la Figura 1.b, el tiempo disponible para llevarlas a cabo era muy reducido, especialmente en invierno. Necesariamente, por corta que fuera su duración, muchas de las misas se habrían de llevar a cabo simultáneamente.



a. Situación de las celebraciones b. Horario en el solsticio de invierno

Figura 1. Situación y horario principal de las celebraciones en un día normal

De lo anterior deducimos con toda seguridad la coincidencia de varias misas en las distintas capillas perimetrales e interiores y posiblemente, a falta de confirmación documental en contra, la de algunas misas con la Liturgia de las Horas.

2. METODOLOGÍA

Para la simulación se contaba con el modelo acústico virtual validado en el software Odeon, ya utilizado en anteriores trabajos [1]. El procedimiento llevado a cabo ha sido el siguiente:

- Selección de casos a partir del tipo de situación a estudiar.
- Establecimiento del ruido de fondo.
- Determinación del ruido ambiental.
- Establecimiento de criterios de definición de los espacios aurales.
- Obtención de los valores de STI con Odeon 11.0
- Determinación de los horizontes acústicos con ArcGIS 10.0

2.1. Selección de casos

El objetivo es determinar por un lado si la presencia de actividad en las capillas perimetrales podía dificultar o impedir la realización de las celebraciones en otros espacios y por otro si la actividad en estos espacios haría lo propio en las capillas. Para el análisis de estas dos situaciones se han seleccionado los siguientes espacios litúrgicos:

1. Coro: para la Liturgia de las Horas, exclusiva de los clérigos y en gran medida cantada, es fundamental la coordinación y comprensión del mensaje. Por otro lado su nivel de emisión sonora es muy alto, al estar realizada por hasta 120 personas.

2. Capilla de Nuestra Señora de la Estrella: está totalmente abierta a la nave central, por lo que la afección recíproca con las capillas perimetrales podía ser muy acentuada.

3. Capilla de San Juan está dentro del conjunto de capillas de la girola, una zona de intensa actividad litúrgica. En este caso además de la afección de las capillas, se ha estudiado también si el Coro, por su magnitud, podía interferir de forma excesiva.

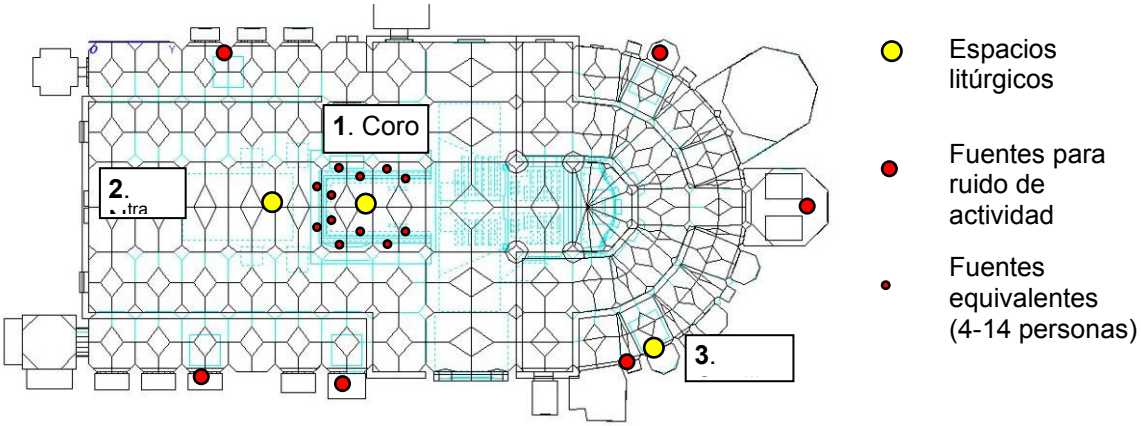


Figura 2. Situación de las fuentes y zonas estudiadas en el modelo de simulación

Los espacios litúrgicos se han analizado en dos estados: sólo con ruido de fondo y con ruido ambiental. En el análisis de la fuente en la Capilla de San Juan se ha estudiado también la actividad en el Coro como incremento del ruido ambiental y como fuente sonora en "competencia". Quedan así los siguientes siete modelos de análisis:

- Modelos M1.1 (Coro), M2.1 ($N^{tra}S^{a}$ de La Estrella), M3.1 (C.San Juan): Ruido de fondo

- Modelos M1.2 (Coro), M2.1 ($N^{tra}S^{a}$ de La Estrella), M3.2 (C.San Juan): Ruido ambiental

- Modelo M3.3 (C.San Juan): Ruido ambiental + Liturgia de las Horas en el Coro

2.2. Ruido de fondo (RF)

Se ha considerado en todos los modelos de simulación un ruido de fondo uniforme en toda la catedral. Su valor en tercios de octava (Fig. 3) se ha obtenido como promedio de cuatro de las seis medidas realizadas in situ, eliminando la de mayor y la de menor SPL.

2.3. Ruido ambiental (RA)

Con la hipótesis de seis capillas perimetrales con actividad simultánea a la de la fuente del espacio litúrgico objeto de estudio, se ha obtenido el valor promedio en cada uno de los casos (Fig. 3). Las fuentes en las capillas perimetrales (misas privadas) son del tipo 'Normal-Natural' y en el trascoro (misa leída con fieles) del tipo 'Raised-Natural'. En el Coro se han utilizado fuentes del tipo 'Normal-Natural' y para reducir los tiempos de análisis del software se han situado 12 fuentes de potencia sonora equivalente a entre 4 y 14 personas, estimando la ocupación total máxima habitual del Coro en la Liturgia de las Horas en un 75% (90 personas).

	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Normal	60,7	60,9	65,3	69,0	63,0	55,8	49,8	44,5
Raised	65,0	65,0	69,6	74,8	71,8	63,8	57,3	48,5
Coro (equiv. 90 p.)	80,2	80,4	84,8	88,5	82,5	75,3	69,3	64,0

Tabla 1. Nivel de presión sonora de las fuentes (dB)

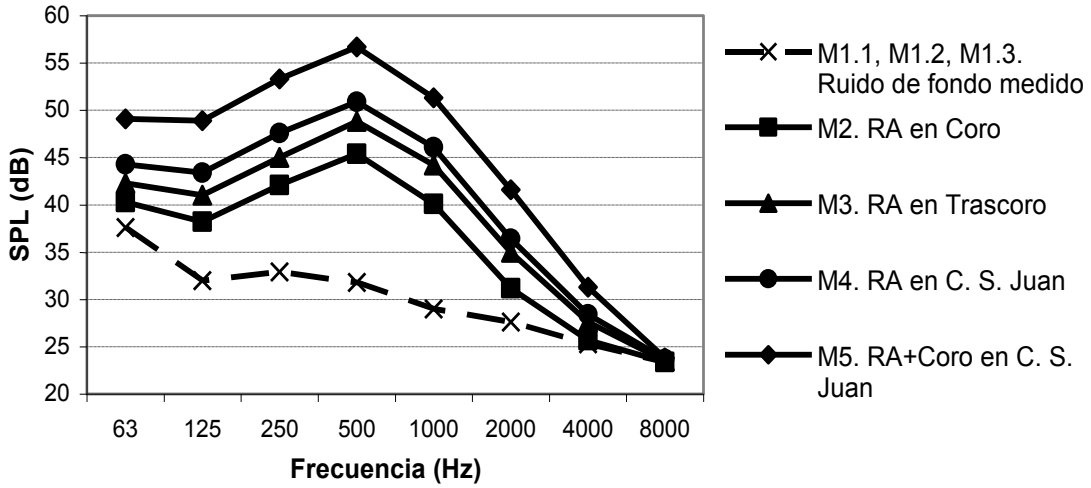


Figura 3. Ruido de fondo y ruido ambiental considerado en los modelos

2.4. Criterios de definición de los espacios aurales

Como se ha comentado se han utilizado los parámetros decrecimiento espacial del STI, r_D (distancia de distracción, STI<0,50) y r_P (distancia de privacidad, STI<0,20). Dentro del espacio definido por la distancia de distracción la concentración y la privacidad empiezan a crecer significativamente. Con distancias a la fuente sonora mayores que la de privacidad se empieza a percibir la sensación de estar en un espacio separado acústicamente.

Para determinar el espacio aural en los casos estudiados, se ha considerado lo siguiente:

- En el Coro es necesario no tener ninguna distracción respecto a otras celebraciones, luego el espacio aural se define con una r_D de STI>0.5

- En la Capillas de Ntra Sª de la Estrella es necesario no tener distracción para el oficiante y tener privacidad para los fieles por lo que el espacio aural se define con r_D STI>0.5 y r_P STI>0.2

2.5. En la Capilla de San Juan es necesario no tener distracción para el oficiante y no es necesaria ninguna condición para los fieles pues no son misas previstas para su asistencia, luego el espacio aural se define con r_D STI>0.5

2.6. Obtención de los valores de STI

A partir del modelo validado, se han realizado modelos virtuales adaptados a las condiciones concretas de cada caso. Los valores de ruido ambiental obtenidos se han incorporado como ruido de fondo. Las rejillas de resultados se han planteado de un metro de lado (7.336 puntos)

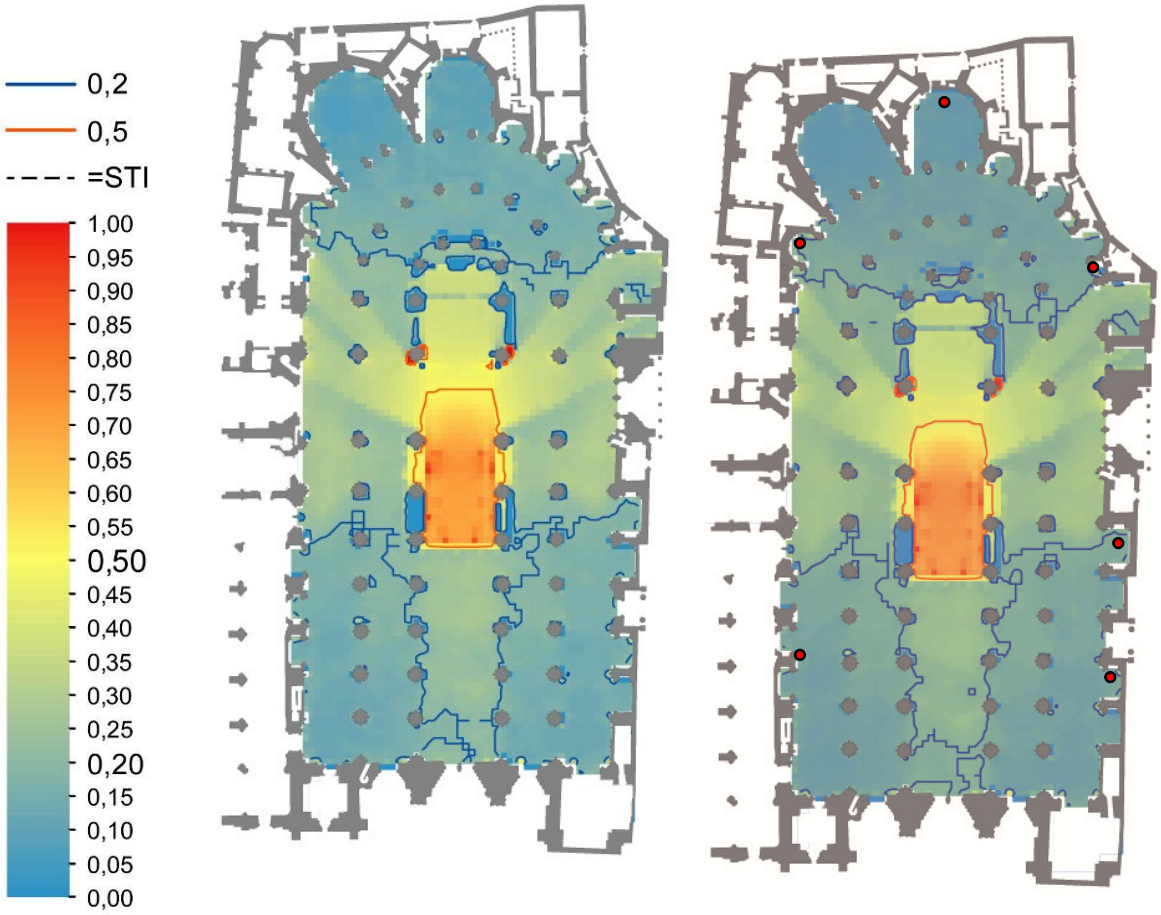
2.7. Determinación de los horizontes acústicos

Los datos de STI se han introducido en el software de información geográfica, obteniéndose los mapas de STI y las curvas STI=0,5 para r_D y STI=0,2 para r_p con las que delimitar las áreas de distracción y privacidad. También se ha obtenido la línea en la que el STI de la actividad en el Coro es igual a la de la Capilla de Ntra Sª de la Estrella y la de la Capilla de San Juan, para así establecer la zona frontera aproximada donde una fuente sería predominante respecto a la otra y comprobar si sería válida la hipótesis del Coro como ruido de fondo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todo el Coro se encuentra dentro del área definida por la distancia de distracción, tanto en el caso de considerar sólo el ruido de fondo como con el ruido ambiental incluido, existiendo muy pocas diferencias entre ambos casos. Esto es así principalmente por su posición central alejada de las capillas perimetrales y por estar espacialmente confinado en tres de sus lados por la estructura muraria de soporte de la sillería y por los órganos en dos de los intercolumnios laterales.

El área dentro de la distancia de privacidad ocupa todo el tramo de la catedral definido por Capilla Mayor, el Crucero y el Coro, así como prácticamente toda la nave central. Las capillas de los pies y la mayoría de las de la girola quedan fuera de su área de influencia.

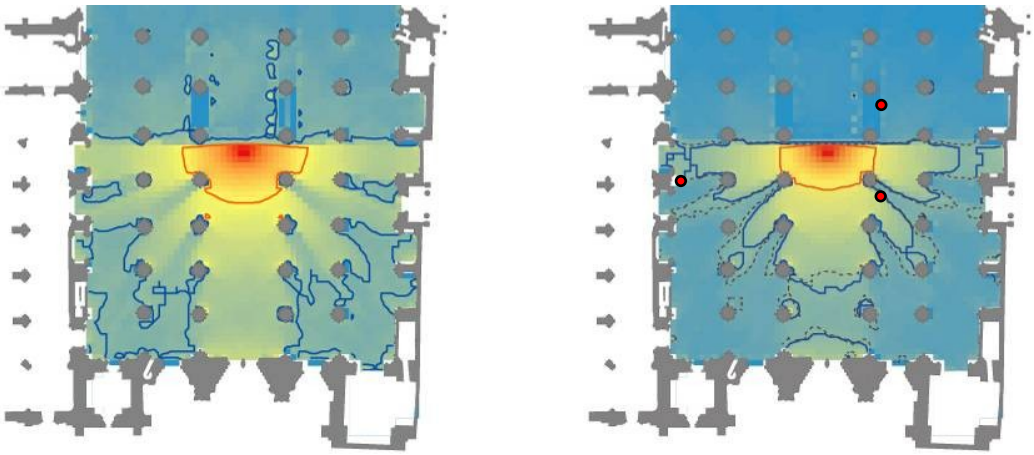


Leyenda (para todas las figuras)

a. M1.1 Con ruido de fondo

b. M1.2 Con ruido ambiental

Figura 4. Horizontes acústicos del Coro



a. M2.1 Con ruido de fondo

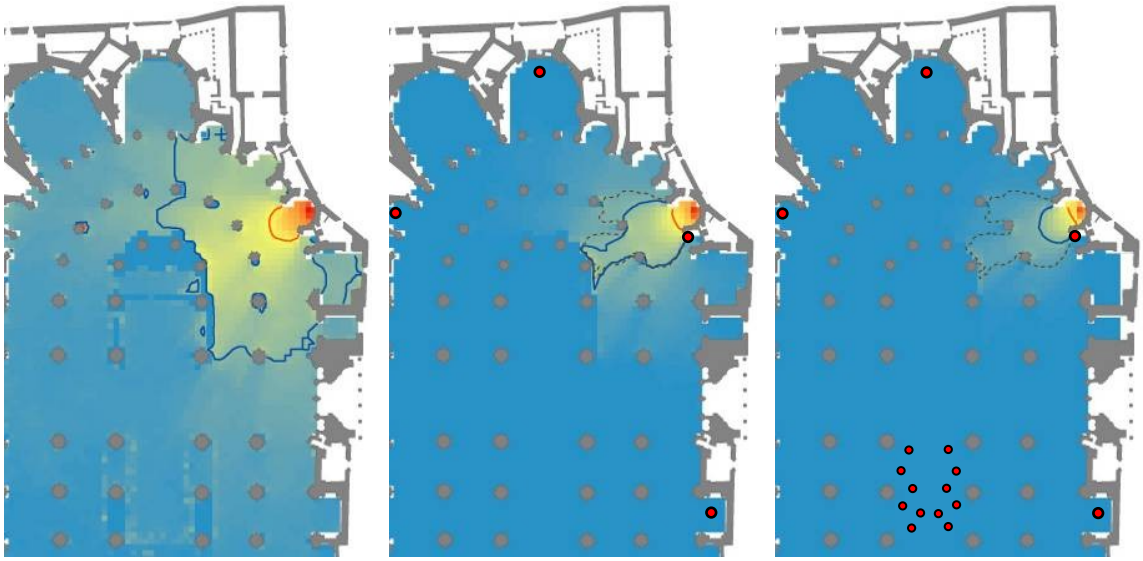
b. M2.2 Con ruido ambiental

Figura 5. Horizontes acústicos de la Capilla de Nuestra Señora de la Estrella (trascoro)

Los horizontes acústicos de la Capilla de N^{tra} Sª de la Estrella muestran claras diferencias con y sin ruido ambiental. Mientras la distancia de distracción es de unas dimensiones similares en ambos casos, el área delimitada por la distancia de privacidad se ve muy reducida, pasando de ocupar toda la nave central, gran parte de las laterales y las capillas perimetrales, a tres intercolumnios de la nave central y parte de la primera nave lateral.

Este resultado es coherente con el espacio litúrgico de la capilla y beneficioso para las condiciones acústicas de la catedral, ya que la disminución en esas zonas de la inteligibilidad de la palabra emitida en la capilla, es beneficiosa para la privacidad de las celebraciones en las capillas perimetrales.

En el caso de simultaneidad de celebración entre el Coro y la capilla, la línea de igual STI (Fig. 5b) muestra que parte del espacio de la nave dentro de la distancia de privacidad sería sobrepasado por esa línea, por lo que la consideración de la actividad en el Coro como ruido de fondo en esa zona no sería adecuada, al pasar a ser el Coro la fuente predominante.



a. M3.1 Con ruido de fondo

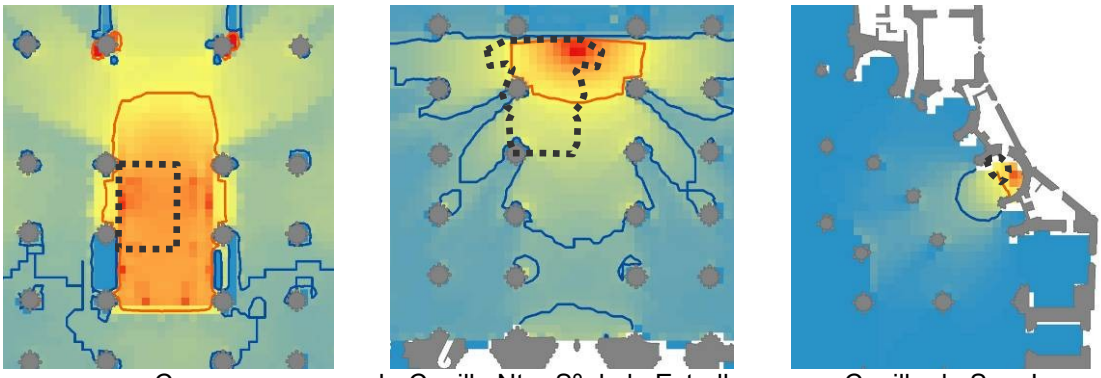
b. M3.2 Con ruido ambiental

c. M3.3 Con r. ambiental+Coro

Figura 6. Horizontes acústicos de la Capilla de San Juan.

La actividad de la Capilla de San Juan considerando sólo el ruido de fondo afectaría claramente a la utilización simultánea de las capillas vecinas.
Con el ruido ambiental el ámbito de privacidad se reduce prácticamente hasta coincidir con el espacio arquitectónico definido por los pilares próximos, manteniéndose toda la capilla por debajo de la distancia de distracción.

Con la incorporación de la actividad en el Coro al ruido ambiental, la parte interior de la capilla se mantiene dentro de las condiciones adecuadas y la distancia de privacidad se reduce drásticamente, siendo no obstante suficiente para los fieles que ocasionalmente se detuvieran.
La línea de igual STI entre el Coro y la Capilla (Figs. 6a y 6b) está claramente fuera de la distancia de privacidad, por lo que se confirma como parte del ruido de fondo en el modelo 3.3.



a. Coro
Con ruido ambiental

b. Capilla Ntra Sº de la Estrella
Con ruido ambiental

c. Capilla de San Juan
Con r. ambiental y Coro

Figura 7. Espacios aurales

3. CONCLUSIONES

Los parámetros de decrecimiento espacial del STI, r_D y r_P sirven como aproximación para determinar los horizontes acústicos, pero en espacios tan complejos es indispensable la realización de ensayos subjetivos para su definición precisa. Para la determinación de los espacios aurales es necesario el conocimiento de la naturaleza de las funciones litúrgicas y de los espacios arquitectónicos que las albergaban. La multiplicidad de situaciones posibles por la combinación de fuentes sonoras simultáneas, originaría varios espacios aurales para cada espacio litúrgico e implica en cada caso la clasificación detallada de las fuentes como parte del ruido de fondo o como sonido en competencia con el emisor considerado.

En la Catedral de Toledo la simultaneidad de múltiples celebraciones es, más que un inconveniente, la forma que encontraron sus usuarios a partir de una necesidad para tener unas condiciones acústicas adecuadas para el desarrollo de su complejo programa litúrgico.

REFERENCIAS

[1] Pedrero, A; Ruiz, R; Díaz-Chyla, A; Diaz, C. Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses. Applied Acoustics 85 (2014) 23–33
[2] Jones, D.M.; Macken, W.J. Auditory Babel and Cognitive Efficiency: Role of Number of Voices and Their Location. Journal of Experimental Psychology: Applied. 1995, Vol 1, Nº 3, 216-226
[3] Bronkhorst, A.W. The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Research on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Conditions. ACUSTICA acta acustica Vol. 86 (2000) 117-128
[4] Blesser B, Salter LR. Spaces speak, are you listening? Cambrigde: MIT Press; 2007.
[5] Norma UNE-EN ISO 3382-3 Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 3: Oficinas diáfanas.
[6] Gonzálvez, R; Pereda, F. La Catedral de Toledo 1549: descripción graphica y elegantissima de la S. Iglesia de Toledo/según el Dr. Blas Ortíz, Antonio Pareja, editor, Toledo, 1999.