



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

MÁSTER DE POSTGRADO EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

Autor:

Don José Manuel Valverde Fuentes

Tutora académica:

Doña María Machimbarrena Gutiérrez

Tutora de prácticas:

Doña Raquel Quintero Espina

Colaboradores:

Don Daniel Bravo Arranz

Valladolid, Julio de 2015



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

MÁSTER DE POSTGRADO EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

Autor:

Don José Manuel Valverde Fuentes

Tutor académico:

Doña María Machimbarrena Gutiérrez

Tutora de prácticas:

Doña Raquel Quintero Espina

Valladolid, Julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas involucradas en el desarrollo de este trabajo su ayuda, en especial a mi tutora María, por sus consejos y paciencia, a la empresa Audiotec, sin la cual este trabajo nunca habría sido posible, a mi tutora de prácticas Raquel, por su apoyo y a mi compañero de empresa Daniel, sin el cual no habría aprendido a manejar en tan poco tiempo uno de los programas necesarios en este trabajo. Y por supuesto a toda mi familia, amigos y a mi novia Nuria, sin los cuales no habría llegado hasta aquí.

RESUMEN

La rehabilitación de monumentos históricos y su posterior cambio de uso es una realidad actual. Este período de crisis ha propiciado que esta práctica aumente su volumen de trabajo frente al decaimiento de la obra nueva. Estas rehabilitaciones conllevan, en la mayoría de los casos, un cambio de uso y la necesidad de acondicionar estos espacios a esos nuevos usos.

En el presente trabajo se estudia el cambio de uso y reforma de la iglesia de San Antonio de Cali. El objetivo es conseguir unas condiciones acústicas óptimas para cada uno de los usos a los que se destinan sus tres naves (sala de conferencias, sala de exposiciones y auditorio).

Otro de los objetivos es poder utilizar y, posteriormente, comparar dos programas comerciales de simulación acústica. Estos programas son CATT Acoustic y Odeon. Para ello se modeliza la iglesia y se realizan diversas simulaciones en busca de unos valores óptimos en los parámetros de estudio.

También se aporta un presupuesto con el fin de dotar al estudio con un carácter algo más realista, y porque no, con vistas a una posible realización del proyecto.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS	16
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	18
2 MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	22
2.1 Acústica de salas: antecedentes históricos y estudios anteriores.....	22
2.1.1 Antecedentes	22
2.1.2 Ejemplos de estudios anteriores.....	24
2.2 Acondicionamiento de salas	25
2.2.1 Acústica geométrica	25
2.2.2 Acústica estadística.....	26
2.3 Acústica de salas: parámetros y valores de referencia.....	26
2.3.1 Tiempo de reverberación (Tr).....	26
2.3.2 Speech Transmission Index (STI).....	29
2.3.3 Early Decay Time (EDT).....	29
2.3.4 Definición (D_{50}).....	29
2.3.5 Claridad (C_{80}).....	30
2.3.6 Nivel de presión sonora con ponderación A (SPL (dBA))	30
2.4 Normativa de referencia y objetivos.....	30
3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS BAJO ESTUDIO	32
3.1 Nave lateral derecha.....	32
3.2 Nave lateral izquierda	33
3.3 Nave central	34
4 SOFTWARE UTILIZADO.....	36
4.1 Odeon.....	36
4.2 CATT.....	37

5	METODOLOGÍA.....	38
5.1	Proceso de modelización	38
5.2	Asignación preliminar de materiales	40
5.3	Asignación de fuentes	41
5.4	Simulación del estado original de la nave central y detección de problemas	42
5.4.1	Tiempos de reverberación	43
5.4.2	Tiempos de reverberación en la nave.....	45
5.4.3	Nivel de presión sonora con ponderación A.....	47
5.4.4	Claridad musical	47
5.4.5	Evaluación del estado inicial.....	49
5.5	Búsqueda y elección de materiales	50
5.6	Simulación de las soluciones propuestas para cada espacio	51
5.6.1	Simulación de la sala de exposiciones	51
5.6.2	Simulación de la sala de conferencias.....	58
5.6.3	Simulación del auditorio.....	69
5.7	Valoración de las reformas	78
6	COMPARACIÓN DE PROGRAMAS DE SIMULACIÓN	80
6.1	Introducción y objetivos	80
6.2	Modelizado, interfaz e introducción de datos	80
6.3	Parámetros acústicos y tiempos de simulación	82
6.4	Otras características.....	83
6.5	Coste económico de adquisición	83
6.6	Comparación de ambos softwares mediante un caso de estudio	85
6.6.1	Tiempos de reverberación.....	85
6.6.2	Tiempos de reverberación en la nave.....	87
6.6.3	Nivel de presión sonora con ponderación A (decibelios A)	90
6.6.4	Claridad musical	90
6.7	Conclusiones.....	93
7	COSTE DE LA REFORMA.....	94
8	CONCLUSIONES.....	102

9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	ANEXO I: SIMULACIONES ACÚSTICAS INTERMEDIAS CON ODEON	106
1.	Sala de exposiciones	107
2.	Sala de conferencias.....	108
3.	Auditorio.....	109
	ANEXO II: SIMULACIONES ACÚSTICAS CON CATT	112
	ANEXO III: PLANOS DE LA IGLESIA.....	114
1.	Plano de situación.....	116
2.	Plano de alzado frontal original y después de la reforma	117
3.	Plano de alzado lateral original	118
4.	Plano de alzado lateral después de la reforma.....	119
5.	Plano de planta acotado.....	120
6.	Plano de la planta original	121
7.	Plano de la planta después de la reforma	122
8.	Plano de la sección transversal original y después de la reforma	123
9.	Plano de la sección longitudinal de la nave central original.....	124
10.	Plano de la sección longitudinal del auditorio	125
11.	Plano de la sección longitudinal de la sala de conferencias y de la sala de exposiciones	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Barrio de San Antonio, alrededor del año 1925.	18
Figura 2.- Sección y planta original de la iglesia de San Antonio de Cali.	19
Figura 3.- Imagen del teatro romano, Clunia.....	22
Figura 4.- Vista del patio de butacas de la sala principal del teatro Calderón de la Barca de Valladolid.....	23
Figura 5.- Interior de un teatro en Detroit transformado en aparcamiento.....	23
Figura 6.- Vista del patio de butacas de la sala principal del auditorio Miguel Delibes de Valladolid	24
Figura 7.- Vista del interior del Parlamento Andaluz, Sevilla.....	24
Figura 8.- Valores recomendados de RT_{medio} (500 Hz – 1000 Hz) en función del volumen del recinto para salas de conferencias/aulas (recintos ocupados).	28
Figura 9.- Valores recomendados de RT_{medio} (500 Hz – 1000 Hz) en función del volumen del recinto para de ópera.	28
Figura 10.- Situación de la nave lateral derecha en la planta de la iglesia.	32
Figura 11.- Situación de la nave lateral izquierda en la planta de la iglesia.	33
Figura 12.- Situación de la nave central en la planta de la iglesia.	34
Figura 13.- Tiempo de reverberación de la nave central en su estado inicial según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.....	43
Figura 14.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB de la nave central en su estado inicial.....	43
Figura 15.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) y una caída de 20 dB (Tr_{20}) en bandas de octava.	44
Figura 16.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 250 Hz.....	45
Figura 17.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 1.000 Hz.	45
Figura 18.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 4.000 Hz.	46

Figura 19.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la nave central.	47
Figura 20.- Valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 250 Hz.....	47
Figura 22.- Valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 4.000 Hz.....	48
Figura 23.- Planta y sección longitudinal de la propuesta de sala de exposiciones.	51
Figura 24.- Tiempo de reverberación de la sala de exposiciones según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.....	53
Figura 25.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB en la sala de exposiciones.	53
Figura 26.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) y una caída de 20 dB (Tr20) en bandas de octava en la sala de exposiciones.....	54
Figura 27.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 500 Hz.....	55
Figura 28.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 1.000 Hz.....	55
Figura 29.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 2.000 Hz.....	56
Figura 30.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la sala de exposiciones.	57
Figura 31.- Planta y sección longitudinal de la sala de conferencias.....	58
Figura 32.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos.	58
Figura 33-36.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos.....	59
Figura 37.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos.	60
Figura 38.- Tiempo de reverberación de la sala de conferencias según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.....	61
Figura 39.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB en la sala de conferencias.	61
Figura 40.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) y una caída de 20 dB (Tr20) en bandas de octava en la sala de conferencias.....	62

Figura 41.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 500 Hz.....	63
Figura 42.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 1.000 Hz.....	63
Figura 43.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 2.000 Hz.....	64
Figura 44.- Valores del STI en diferentes puntos de la sala de conferencias.	65
Figura 45.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la sala de conferencias.	66
Figura 46.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 500 Hz.....	67
Figura 47.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 1.000 Hz.....	67
Figura 48.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una 2.000 Hz.....	68
Figura 49.- Planta y sección del auditorio.....	69
Figura 50.- Tiempo de reverberación del auditorio según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.	71
Figura 51.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB del auditorio.	71
Figura 52.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) y una caída de 20 dB (Tr20) en bandas de octava en el auditorio.....	72
Figura 53.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz.....	73
Figura 54.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 1.000 Hz.	73
Figura 55.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz.	74
Figura 56.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio.....	75
Figura 57.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz.....	76

Figura 58.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 1.000 Hz.....	76
Figura 59.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz.....	77
Figura 60.- Planta y sección de auditorio. Elaboración propia.	85
Figura 61.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con Odeon.....	87
Figura 62.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con CATT.	87
Figura 63.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.....	88
Figura 64.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con CATT.	88
Figura 65.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio con Odeon.	90
Figura 66.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio con CATT.....	90
Figura 67.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con Odeon.	91
Figura 68.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con CATT.....	91
Figura 69.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.	92
Figura 70.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.	92
Figura A.1.- Referencia de la situación de la frecuencia en los esquemas de las simulaciones....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Valores recomendados de STI.....	29
Tabla 2.- Valores óptimos de parámetros a estudiar durante el desarrollo del trabajo	31
Tabla 3.- Evaluación del cumplimiento de los objetivos para la nave central en su estado original.	49
Tabla 4.- Tabla-resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para la sala de exposiciones.....	57
Tabla 5.- Valores del tiempo de reverberación en diferentes puntos de la sala de conferencias. .	66
Tabla 6.- Tabla-resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para la sala de conferencias.	68
Tabla 7.- Comparativa entre tiempos de reverberación por el método de rayos y por el método estadístico en bandas de octava en el auditorio.	72
Tabla 8.- Resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para el auditorio.....	77
Tabla 9.- Resumen con la comparativa de los resultados de la simulación inicial y la simulación final para el auditorio.....	77
Tabla 10.- Comparativa de modelizado, interfaz e introducción de datos de cada uno de los programas de simulación.....	81
Tabla 11.- Resumen con los parámetros proporcionados por cada uno de los programas de simulación	82
Tabla 12.- Resumen con la información suplementaria proporcionada por cada uno de los programas de simulación	83
Tabla 13.- Resumen con la información sobre los costes de adquisición de programa Odeon.....	83
Tabla 14.- Tabla-resumen con la información sobre los costes de adquisición de programa CATT.	84
Tabla 15.- Diferencias en el T30 en bandas de octava en el auditorio entre CATT y Odeon	86

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La acústica es uno de los campos de estudio más interesantes actualmente, puesto que empieza a haber una concienciación real sobre los perjuicios que tiene el ruido sobre nuestra salud. Este hecho, junto con mi predisposición a estudiar, me llevaron a decantarme por un máster relacionado con la arquitectura, pero en un campo bastante farragoso para nosotros los arquitectos, puesto que en la escuela las asignaturas que aportan conocimientos sobre acústica son prácticamente nulas, una mínima parte de una obligatoria y una optativa. Este trabajo fin de máster (en adelante TFM) es una parte importante del mismo y es una oportunidad de poner en práctica muchos de los conocimientos adquiridos durante estos 6 meses. Me decidí por la opción de desarrollarlo en una empresa por la oportunidad que supone ganar 3 meses de experiencia y los conocimientos que puedo adquirir durante mi estancia. Desde la empresa se propusieron dos temas para el TFM, eligiendo el titulado “*estudio de acondicionamiento acústico en rehabilitación de recinto religioso como salón de actos*”.

Me pareció una buena idea, puesto que se me presentaba la oportunidad de aprender el manejo de programas de simulación acústica y a la vez entrar en el campo de la rehabilitación, no directa de modificación de la parte constructiva, pero si desde el punto de vista de la rehabilitación del uso que tiene.

La empresa en la que realicé mi estancia formativa es Audiotec. Se localiza en el parque tecnológico de Boecillo, en la provincia de Valladolid. Ofrece servicios en el campo de la acústica ambiental, industrial, en edificación, investigación y en el desarrollo de productos propios. En ella he llevado a cabo parte del desarrollo del TFM, pero también he participado en la realización de planes de seguridad y salud, realización de detalles constructivos para obras, infografías para clientes, visitas de obra...

El presente trabajo tiene como fin la optimización del acondicionamiento acústico de una iglesia con una nave central y dos patios. Se encuentra en Cali, Colombia. Esta iglesia me fue propuesta porque técnicos de la empresa Audiotec estuvieron de visita en Cali y les propusieron su acondicionamiento, pero el proyecto no tuvo mayor desarrollo. Se trata de una iglesia de estilo colonial y se encuentra en el barrio de San Antonio, conocido como “Cali Viejo”. La capilla se funda en 1744 [1] en homenaje al Santo de Padua y es quien le da el nombre al tradicional barrio.



Figura 1.- Barrio de San Antonio, alrededor del año 1925 [1].

“El barrio de San Antonio es un singular ejemplo de patrimonio vivo, cuya riqueza no se limita a su valor de paisaje urbano sino que radica, sobre todo, en la expresión cotidiana de sus habitantes, custodios de las tradiciones orales que le dieron identidad a la ciudad”

Ricardo Mocada Esquivel, periodista de gaceta. Lunes, 11 de abril de 2011.

Fue concebida en su diseño original (figura 2) con el prototipo de las capillas doctrineras, con atrio principal y lateral, tres puertas, la principal y dos laterales, coro isabelino, una única nave de proporción uno de ancho por dos de largo, arco toral que separaba al pueblo del clero, presbiterio con altar y retablo de madera dorada de proporción uno de largo por dos de alto y sacristía anexa.

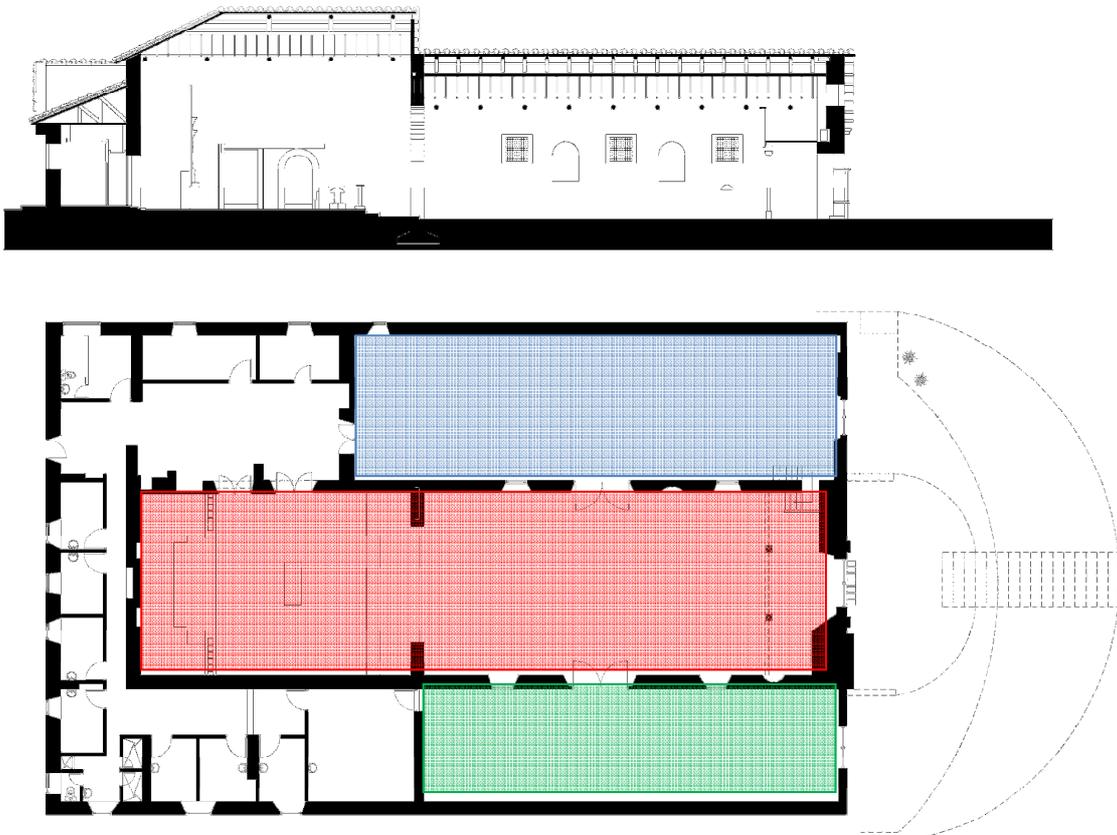


Figura 2.- Sección y planta original de la iglesia de San Antonio de Cali. Elaboración propia.

Puesto que es un proyecto de reforma que no se va a llevar a cabo, se cuenta con más grados de libertad y por ello se decide modificar la morfología de la iglesia. Se decide tapar los dos patios laterales anexos a la nave central y tener la oportunidad de esta manera de disponer de tres espacios independientes. Esto da un gran juego puesto que se tiene la oportunidad de poder utilizar cada uno de ellos para usos diferentes, acondicionándolo en función de ese uso previsto. También se reserva dos espacios, por delante del graderío en el auditorio y de la primera fila en la sala de conferencias, para personas de movilidad reducida, con todos los recorridos adaptados a estas personas.

El desarrollo del TFM va a tener una utilidad práctica, puesto que actualmente la rehabilitación está en auge y los edificios religiosos cambian sus usos a otros, como puede ser sala de exposiciones, de música, salón de actos o polivalente por lo que este trabajo puede servir como ayuda a futuros proyectos de este tipo que vayan a desarrollarse en nuestro país, o en países de Latinoamérica.

Como complemento final se hará una comparativa entre los programas utilizados para la simulación acústica. Estos programas son Odeon y CATT Acoustic.

Los objetivos que se persiguen con este trabajo son:

- Evaluar el estado inicial del acondicionamiento acústico de la nave central.
- Hacer un diseño adecuado y óptimo encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico de la nave central para su uso como auditorio.
- Hacer un diseño adecuado y óptimo encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico del patio lateral derecho para su uso como sala para la palabra.
- Hacer un diseño adecuado y óptimo encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico del patio lateral izquierdo para su uso como sala de exposiciones.
- Conocer y valorar dos programas de simulación acústica.

2 MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

2.1 Acústica de salas: antecedentes históricos y estudios anteriores

2.1.1 Antecedentes [2]

Acústica del teatro antiguo (Siglos I a.C. – V d.C.)

El estudio de la acústica de salas se comenzó a tratar en la época romana, una vez que se empieza a instaurar el modelo de teatro (antiguo). Hasta nuestra época sólo ha llegado un tratado sobre arquitectura de la época romana, el escrito por Marco Vitruvio Polión, titulado “*los diez libros de la arquitectura*”. En él se detallan principios acerca de la construcción de teatros, con el fin de que las condiciones acústicas sean las óptimas. Habla del lugar, de la armonía, de los vasos de bronce (resonadores), de la forma del teatro, de los teatros griegos, de la elección de un emplazamiento con buena



Figura 3.- Imagen del teatro romano, Clunia [2].

acústica y de los pórticos y paseos del teatro. Estos teatros romanos se extendieron por todo el Mediterráneo y parte de Europa. En Clunia (figura 3) tenemos los restos de un teatro de este tipo.

Acústica medieval y moderna (Siglos del V al XIX)

De los teatros romanos, se pasa a una época en la que se empieza a predicar en las iglesias. Se pasa de un modelo de iglesia en el cual la predicación se realiza mediante el canto (se intenta conseguir el mayor tiempo de reverberación que se pueda), a otro modelo en el que se sitúa dentro de la misma un espacio para la dicha función (púlpito). Por otro lado, durante los siglos XVIII y XIX, en las ciudades europeas se empieza a instaurar el modelo de sala. Un espacio cerrado dedicado a las representaciones

teatrales, copiando el modelo de teatro romano, pero con espacios propios para las relaciones sociales. En Valladolid tenemos como ejemplos el teatro Calderón de la Barca (figura 4) o el teatro Lope de Vega.



Figura 4.- Vista del patio de butacas de la sala principal del teatro Calderón de la Barca de Valladolid [21].

A finales del siglo XIX, el teatro entra en crisis, y estas salas pasan a tener muchos usos, como celebración de bodas o reconversión en aparcamientos (figura 5).



Figura 5.- Interior de un teatro en Detroit transformado en aparcamiento [2].

Acústica contemporánea (Siglos XX y XXI)

Los espacios contemporáneos para el disfrute de la música se caracterizan por tener grandes capacidades y estar muy estudiados desde el punto de vista del acondicionamiento acústico. Se usan elementos como tornavoces, elementos colgados

del techo para homogeneizar la distribución de las reflexiones, graderíos reflectantes, elementos que corten las reflexiones que recorren la sala transversalmente, etc. En Valladolid, uno de estos espacios es el auditorio Miguel Delibes (figura 6).



Figura 6.- Vista del patio de butacas de la sala principal del auditorio Miguel Delibes de Valladolid [22].

Durante los últimos años, y debido a la época de crisis actual, se están promoviendo intervenciones encaminadas a poner en valor espacios en desuso. Algunas iglesias están cambiando su uso, y están convirtiéndose en lugares donde se puede disfrutar de la música o de una conferencia. Esto es posible gracias a los estudios de acondicionamiento de dichas iglesias, que permiten modificar sus condiciones acústicas, creando unos entornos adecuados para cada uso.

2.1.2 Ejemplos de estudios anteriores

Al indagar en la bibliografía existente en el campo de estudio de la rehabilitación acústica de espacios religiosos, se han encontrado gran cantidad de estudios y trabajos, de entre los cuales se presentan a continuación dos de los más significativos. En la bibliografía [3] se encuentra el estudio completo de ambos.

Iglesia del Hospital de las Cinco Llagas de Sevilla (figura 7)

Es una de las intervenciones de rehabilitación más importantes llevadas a cabo en



Figura 7.- Vista del interior del Parlamento Andaluz, Sevilla [23].

Andalucía, convirtiéndose en sede del Parlamento Andaluz. A pesar de tener unas formas y dimensiones poco recomendables, desde el punto de vista acústico, para el uso que se pretende dar al recinto, el recinto está en uso actualmente, de modo plenamente satisfactorio.

Iglesia del convento de San Francisco de Baeza

A parte de las obras de rehabilitación, tuvo que restaurarse parte de la iglesia, al encontrarse esta en estado ruinoso. Se le asignó un uso como sala polifuncional para actividades culturales, principalmente conferencias y conciertos. Una vez terminada dicha restauración, y una vez puesta en uso, se detectaron graves deficiencias acústicas y un ruido de fondo excesivamente alto, sobre todo debido al escaso aislamiento de las grandes superficies acristaladas. Después del estudio acústico, la sala quedó preparada para albergar con dignidad las distintas actividades culturales que se le han asignado.

2.2 Acondicionamiento de salas

Para el estudio del acondicionamiento de una sala [4] [5] [2] es necesario conocer los tres fenómenos que influyen en la propagación de la energía en una sala. Estos fenómenos son la reflexión (especular y difusa), la difracción y la absorción. El estudio del acondicionamiento a su vez se puede abordar bajo tres modos diferentes: acústica geométrica, acústica ondulatoria y acústica estadística. En este caso, para realizar simulaciones acústicas, sólo se emplearán las primeras puesto que son las usadas por los programas comerciales de los que se dispone.

2.2.1 Acústica geométrica

Se basa en la hipótesis de reflexiones especulares y es la que usan los programas de simulación. Es imprescindible en cualquier estudio acústico ya que permite conocer los posibles ecos y focalizaciones. Se basa en el trazado de rayos, aplicando las leyes de la óptica geométrica que simplifican el modelo:

- Propagación rectilínea
- Leyes de la reflexión especular
- Leyes de la reflexión difusa
- Leyes de la refracción (cambio de dirección con el cambio de medio)

Para que haya una reflexión especular es necesario que las dimensiones de la sala sean grandes en comparación con la longitud de onda y superficies lisas y muy reflectantes.

El límite de la acústica geométrica lo encontramos cuando hay una estabilización de la energía entre la emisión y la absorción, entonces se estudia la energía acústica en conjunto.

2.2.2 Acústica estadística

Como se ha comentado, llega un momento en que hay una estabilización entre energía emitida y absorbida, por lo que se estudia cómo se comporta cada uno de los rayos individualmente, estudiando la energía en conjunto. Imaginemos una fuente acústica que irradia energía en el interior de una sala. En un principio las ondas se propagan libremente en el interior del recinto. A partir de cierto instante, las ondas empiezan a reflejarse en las paredes, de modo que las ondas reflejadas y las incidentes se superponen. Si en un momento dado la fuente deja de emitir, el sonido no desaparece inmediatamente, sino que persiste hasta que es absorbido por las paredes. Esto es lo que se denomina reverberación. Para estudiar este fenómeno no basta con examinar el camino seguido por los rayos sonoros emitidos por la fuente, sino que hay que realizar un estudio estadístico de todos los rayos presentes en el recinto.

2.3 Acústica de salas: parámetros y valores de referencia.

Se van a emplear los parámetros más comúnmente utilizados, y que permiten obtener una correcta apreciación de la acústica del entorno. Son los siguientes:

2.3.1 Tiempo de reverberación (T_r)

Cuando se para una fuente sonora que está radiando sonido en un recinto determinado, un oyente, situado en la sala, seguirá oyendo el sonido durante un lapso de tiempo en el que la energía presente en la misma sea absorbida por sus superficies límite. Subjetivamente, el tiempo de reverberación se interpreta como el tiempo de persistencia del sonido en el recinto hasta hacerse inaudible [6]. Técnicamente, se define [7] como el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya a la millonésima parte de su valor inicial, lo que equivale a 60 dB. La medición se realiza emitiendo un ruido corto y seco en el recinto y registrando cómo evoluciona la intensidad con la que se percibe.

Las ecuaciones [8] para su cálculo son las siguientes (acústica estadística):

$$T_{r \text{ (Eyring)}} = - \frac{0,161 \times V}{S \times \ln(1-\alpha)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$T_r(\text{Sabine}) = \frac{0,161 \times V}{A_{equiv}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$T_r(\text{Arau-Puchades}) = \frac{0,161 \times V}{A_{equiv1}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Dónde:

V = volumen de la sala (m^3)

$\alpha = (\sum_i \alpha_i S_i) / S_{tot} =$ coeficiente medio de absorción del recinto (m^2)

$\alpha_i =$ coeficiente de absorción del material "i"

"i" $S_i =$ área de la superficie de material "i" (m^2)

$A_{equiv} = \alpha \times S_{tot} =$ absorción total del recinto (sabinios)

$A_{equiv1} = \alpha_{arp} \times S_{tot} =$ absorción total del recinto (sabinios) (ecuación de Arau-Puchades)

$$\alpha_{\text{Arau-Puchades}} = \left[[\alpha_x]^{\frac{S_x}{S}} \times [\alpha_y]^{\frac{S_y}{S}} \times [\alpha_z]^{\frac{S_z}{S}} \right]$$

$\alpha_x =$ coeficiente de absorción medio del techo y suelo

$\alpha_y =$ coeficiente de absorción medio de las paredes laterales

$\alpha_z =$ coeficiente de absorción medio de las paredes frontales

Las aproximaciones que se realizan en estos casos son las siguientes:

Arau – Puchades [9]:

- Válida para una distribución no uniforme de los materiales absorbentes en un recinto
- Si la distribución de material absorbente es uniforme, se obtiene el coeficiente de absorción de Eyring
- Si α medio es pequeño, caso de las salas vivas, se obtiene el coeficiente de absorción de Sabine

Eyring [2]:

- Todas las superficies tienen un α similar

- Se usa el valor promedio de α

$$\alpha_{\text{prom}} = \frac{A_{\text{equivalente}}}{S_{\text{total}}}$$

Sabine [2]:

- Además de lo anterior supone α pequeño ($<0,2$)

El tiempo de reverberación calculado por el método de Sabine a veces es excesivamente alto ya que supone una absorción de la energía gradual cuando en realidad se produce a saltos en las reflexiones (si $\alpha_{\text{prom}} > 0,2$ se da un error en torno al 10%). Por todo ello se producen diferencias en los valores obtenidos por estos tres métodos.

Puesto que todos los valores de los coeficientes de absorción, para todos los materiales originales y los que se usarán en la reforma, menos el absorbente (que ocupará poco m^2 respecto a los demás), están por debajo de 0,2, se tomará como referencia el valor del tiempo de reverberación por el método de Sabine. Se cumplen todas las aproximaciones de este método. Algunos valores de referencia para diferentes usos de salas y volúmenes se muestran en las figuras 8 y 9.

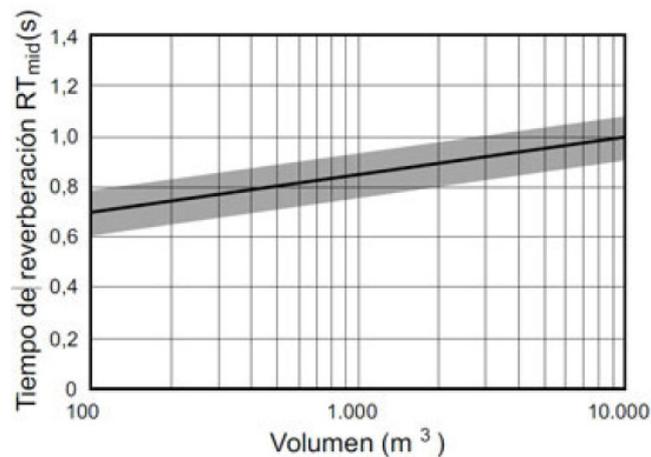


Figura 8.- Valores recomendados de RT_{medio} (500 Hz – 1000 Hz) en función del volumen del recinto para salas de conferencias/aulas (recintos ocupados). [14]

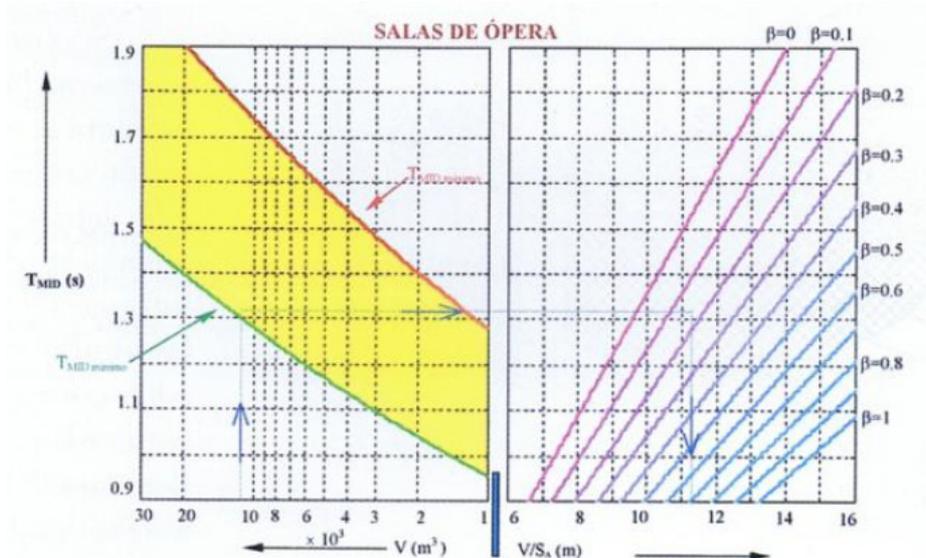


Figura 9.- Valores recomendados de RT_{medio} (500 Hz – 1000 Hz) en función del volumen del recinto para de ópera [9].

2.3.2 Speech Transmission Index (STI)

Es el parámetro que permite conocer la inteligibilidad de la palabra en una sala. Toma valores comprendidos entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo de una sala.

Su clasificación podría ser la siguiente:

STI	0,24-0,34	0,36-0,49	0,50-0,64	0,66-0,87	0,88-1,00
Inteligibilidad	Mala	Pobre	Aceptable	Buena	Excelente

Tabla 1.- Valores recomendados de STI. Elaboración propia.

2.3.3 Early Decay Time (EDT)

Es una de las formas de medida existentes para determinar el descenso en dB de una señal acústica en una sala desde el momento en el que la fuente deja de emitir. Es el Tr_{60} que resulta de interpolar una recta cuando el intervalo de tiempo que se toma es el de una caída de 10 dB. Se calcula multiplicando por 6 el Tr_{10} .

Está directamente relacionado con el tiempo de reverberación, la diferencia es que el EDT mide la reverberación percibida (subjetiva) y el Tr la reverberación real (objetiva). Por ello es más recomendable guiarse por el EDT para determinar el grado de viveza de una sala. Para el caso de salas con geometrías regulares y distribución homogénea de materiales absorbentes donde hay una difusión uniforme del sonido, la curva de decaimiento de energía presentará una única pendiente, por lo que los valores de EDT y Tr serán los mismos.

Los valores aconsejables son aquellos que cumplan que la media del EDT para las frecuencias de 500 Hz y 1.000 Hz con la sala vacía sean lo más parecido posible a los valores medios en las mismas frecuencias del Tr .

$$EDT_{\text{medio}} = Tr_{\text{medio}} \quad [10]$$

Esto solo sucederá en el caso de que haya una perfecta difusión del sonido en la sala. Como esto nunca sucederá podemos concluir que si obtenemos un valor menor de EDT que de Tr la sala resultará más apagada de lo que podría indicar el Tr .

2.3.4 Definición (D_{50})

Este parámetro nos da una idea de la claridad auditiva y representa la proporción de energía que llega durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo respecto de la energía sonora total recibida. Por este motivo dependerá de la posición del oyente respecto a la fuente sonora, disminuyendo al aumentar la distancia a la misma.

Esto es debido a que al alejarse de la fuente aumenta el nivel del campo reverberante y en consecuencia la proporción de energía en las primeras reflexiones disminuye.

Su valor se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}, \text{ donde } p \text{ es la presión sonora.} \quad (\text{Eq. 4}) [11]$$

2.3.5 Claridad (C_{80})

La claridad musical indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Es la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después de esos primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencia entre 125 Hz y 4 KHz. Se elige el intervalo de los primeros 80 ms porque las reflexiones que llegan al oyente son integradas por el oído junto con el sonido directo y por tanto ayudan a aumentar la claridad musical.

Beranek recomienda para una sala vacía que el valor de la claridad [12] se sitúe preferentemente entre:

$$-4 \text{ dB} \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$$

En cualquier caso, deben evitarse valores de claridad mayores de +1dB.

L. G. Marshall propone el siguiente margen para salas ocupadas:

$$-2 \text{ dB} \leq C_{80} \leq +2 \text{ dB}$$

Su valor se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB, donde } p \text{ es la presión sonora.} \quad (\text{Eq. 5}) [11]$$

2.3.6 Nivel de presión sonora con ponderación A (SPL (dBA))

Mide el nivel de presión sonora ponderado A en cada punto de la sala y refleja cómo se distribuye el sonido dentro de la misma. Con ello podemos ver si hay zonas donde no llegue suficiente sonido o zonas donde haya demasiado nivel por concentración de reflexiones y actuar en consecuencia.

2.4 Normativa de referencia y objetivos

Partiendo de la base de que en Colombia no existe ningún tipo de normativa en cuanto a ruido o acústica en el interior de edificios, o recintos destinados a usos específicos, se

elige ceñirse a la normativa de aplicación para este caso en Valladolid, utilizándose por lo tanto la normativa estatal y autonómica correspondiente. Son los siguientes documentos:

- *Real Decreto 1371/2007, de 19 de Octubre, por el que se aprueba el documento básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación.*
- *Ley 5/2009 del ruido de Castilla y León.*

Dentro del Código Técnico se establecen los siguientes objetivos a cumplir dependiendo de diferentes factores ([13] apartado 2.2 b)):

“El *tiempo de reverberación* en aulas y en salas de conferencias vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,5 s”.

Para nuestro caso, solo tenemos la nave lateral izquierda con un volumen menor de 350 m³, pero está destinada a sala de exposiciones, por lo que no debe cumplir con este valor. Tomaremos como referencia las gráficas vistas en el apartado 2.a. tiempo de reverberación.

Para nuestro caso, en el que tenemos un volumen de 460 m³, el tiempo de reverberación óptimo estaría entre los 0,7 s y los 0,9 s. De acuerdo a la bibliografía consultada [12] [14] [9], se estima que los valores óptimos de los distintos parámetros de interés son los reflejados en la tabla 2. Estos son, pues, los valores objetivos que se pretende conseguir para los distintos espacios a través del proceso de simulación.

Parámetro \ Sala	Nave lateral derecha (conferencias)	Nave central (música)	Nave lateral izq. (exposiciones)
Tr (s)	0,7 – 1,0	1,3 – 1,7	0,5 – 1,0
STI	≥0,65	-	-
EDT (s)	0,7 – 0,9	1,3 – 1,7	0,5 – 1,0
D₅₀ (dB)	>50%	-	-
C₈₀	-	-2 dB ≤ C ₈₀ ≤ +2 dB	-

Tabla 2.- Valores óptimos de parámetros a estudiar durante el desarrollo del trabajo. Elaboración propia.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS BAJO ESTUDIO

Como se ha comentado, el caso bajo estudio se trata de una iglesia de estilo colonial situada en Cali, Colombia. Dispone de una nave central y dos patios laterales. La nave central posee dos niveles de cubierta y un arco toral que separa sendos espacios de alturas diferentes. La estructura es de muros portantes de ladrillo revestidos de mortero de cal. La estructura de cubierta es de madera, con vigas cilíndricas que apoyan en los muros de piedra.

A continuación se procederá a una descripción pormenorizada de cada una de las naves.

3.1 Nave lateral derecha

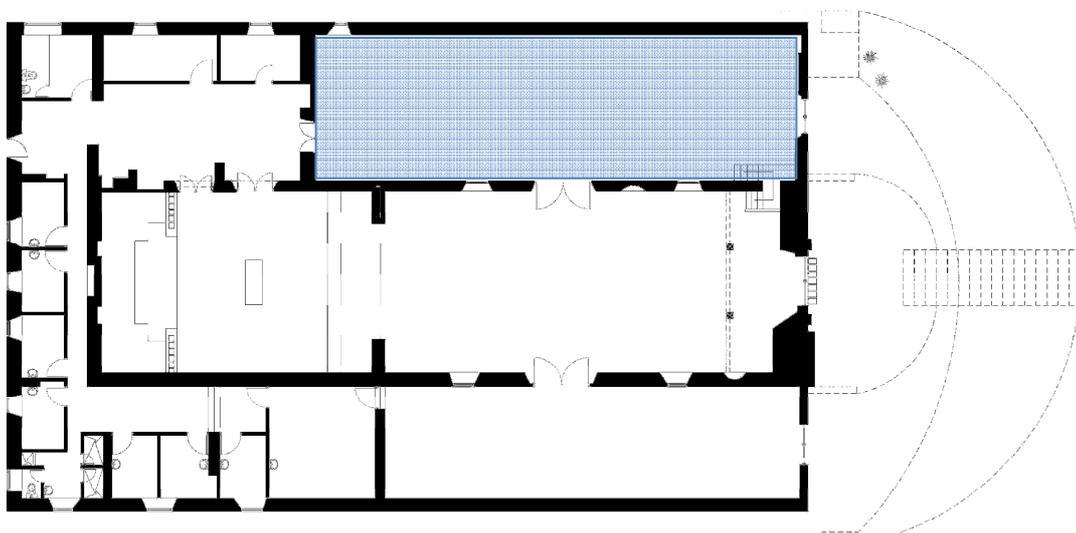


Figura 10.- Situación de la nave lateral derecha en la planta de la iglesia. Elaboración propia.

Tipo de geometría: paralelepípedica con cubierta plana.

Elementos de la sala: puerta de acceso centrada, puerta de acceso a nave central en pared izquierda y tres ventanas de pequeño tamaño en las paredes. Escalera de acceso al coro a la izquierda de la puerta de acceso. Puerta en pared trasera de acceso al convento.

Reformas a llevar a cabo: cerramiento horizontal con cubierta plana ligera, creación de una pequeña zona de almacén (20 m²) y zona de recogida de tiques.

Longitud: 21,80 m

Anchura: 6,60 m

Altura: 3,70 m

Superficie de suelo y techo: 143,88 m²

Superficie de paredes: 210,16 m²

Volumen: 532,36 m³

Volumen previsto después de las reformas: 457,32 m³

Uso previsto y ocupación máxima: palabra (conferencias y charlas), 90-100 personas + 4 plazas de movilidad reducida

Tipo de techo: en la zona de estrado equipotencial (permite repartir de manera homogénea las reflexiones por la sala), el resto absorbente

3.2 Nave lateral izquierda

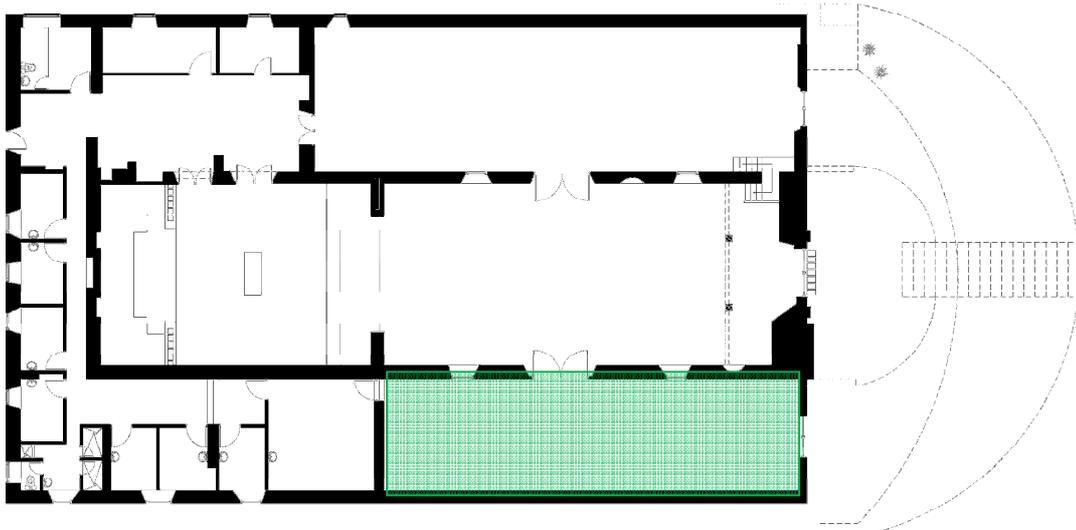


Figura 11.- Situación de la nave lateral izquierda en la planta de la iglesia. Elaboración propia.

Tipo de geometría: paralelepípedica con cubierta plana.

Elementos de la sala: puerta de acceso centrada, puerta de acceso a nave central en pared derecha y dos ventanas de pequeño tamaño en las paredes. Puerta en pared trasera de acceso al convento.

Reformas a llevar a cabo: cerramiento horizontal con cubierta plana ligera, creación de una pequeña zona de almacén (15 m²) y zona de recepción.

Longitud: 20,47 m

Anchura: 5,08 m

Altura: 3,70 m

Superficie de suelo y techo: 95,86 m²

Superficie de paredes: 177,23 m²

Volumen: 354,02 m³

Volumen previsto después de las reformas: 299,18 m³

Uso previsto y ocupación máxima: exposiciones, 50-60 personas

Tipo de techo: plano

3.3 Nave central

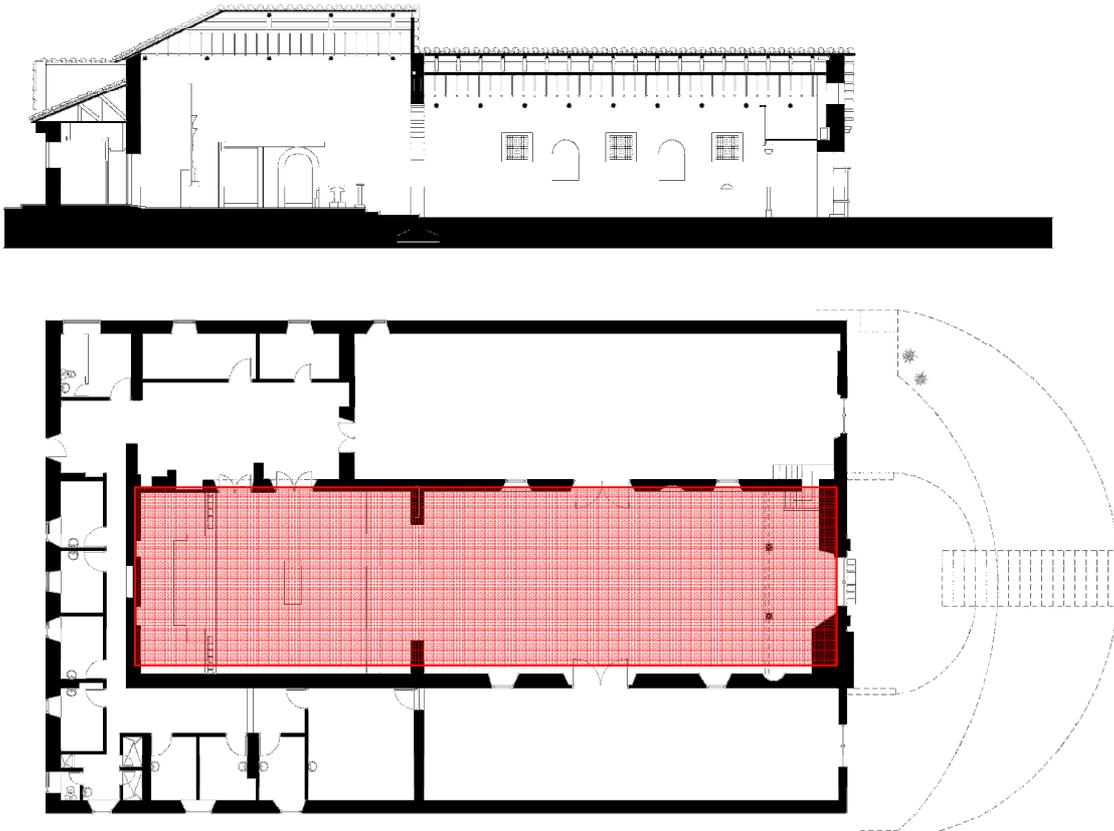


Figura 12.- Situación de la nave central en la planta de la iglesia. Elaboración propia.

Tipo de geometría: Dos volúmenes paralelepípedicos separados por un arco toral. Falso techo formado por tres planos en forma de trapecio isósceles.

Elementos de la sala: puerta de acceso centrada debajo del coro. Arco separador de los dos espacios y retablo en madera. Puertas laterales de acceso a los patios.

Reformas a llevar a cabo: *Eliminación del arco toral y creación de un pequeño almacén (50 m²) y de una zona de recogida de tiques.*

Longitud: 17,72 m (primer volumen) y 12,58 m (segundo volumen).

Anchura: 8,25 m

Altura: 6,32 m (primer volumen) y 8,20 m (segundo volumen)

Superficie de suelo y techo: 257,55 m²

Superficie de paredes: 236,80 m² (primer volumen) y 243,89 m² (segundo volumen)

Volumen: 923,92 m³ (primer volumen) y 851,04 m³ (segundo volumen)

Volumen previsto después de las reformas: 607,92 m³ (primer volumen) y 851,04 m³ (segundo volumen)

Uso previsto y ocupación máxima: música, 155 personas+5 plazas de movilidad reducida

Tipo de techo: original

4 SOFTWARE UTILIZADO

Existen en el mercado diferentes programas dedicados a la simulación acústica que mediante la introducción de una serie de parámetros, se obtiene una respuesta en forma de valores que permiten conocer cómo se comportaría esa sala bajo las condiciones especificadas al inicio. Permiten conocer la respuesta de una sala estudiando las reflexiones, la absorción y las propiedades de dispersión del sonido en las superficies con el fin de lograr la acústica deseada y una reducción adecuada de ruidos para discursos, conciertos, etc. A través de la simulación acústica, es posible predecir, con un intervalo razonable de seguridad, la respuesta impulsiva de una sala a partir de un modelo 3D y es posible obtener resultados en forma de parámetros acústicos, como el tiempo de reverberación $T_{r,30}$, $T_{r,20}$, EDT, STI, SPL, Claridad...

4.1 Odeon

El programa permite obtener los resultados de tiempo de reverberación utilizando distintas funciones. Las utilizadas en este caso son: Job List, Quick Estimate Reverberation, Global Estimate Reverberation. Con "Job List" es posible seleccionar las fuentes que estarán activas (al menos una tiene que estar activa), la señal sonora que emitirán y la orientación de los receptores para cada simulación.

El método utilizado es de trazado de rayos para fuentes puntuales. En caso de fuentes puntuales el método adoptado es híbrido, es decir, combina los métodos "Early Ray Reflection" y "Late Ray Reflection".

Después, se ejecuta la aplicación "Grid Response", que permite obtener un mapa de color (una vez especificada la escala), para cada una de las bandas de frecuencia, en el que se plasman los parámetros acústicos según una cuadrícula, previamente definida, que contiene varios receptores con distancia prefijada entre ellos.

Para definir la rejilla se deben escoger las superficies sobre las cuales estarán los receptores, la distancia entre ellos y su altura respecto a las superficies.

En este caso, los parámetros acústicos se obtuvieron a partir de la respuesta "grid", definiendo una rejilla con receptores distribuidos sobre el suelo, a 1,20 metros de altura y 0,20 metros de separación entre ellos.

En caso de que haya varias fuentes activas, el resultado en cada receptor será la suma de todas las contribuciones procedentes de cada fuente.

Los coeficientes de absorción, para ir mejorando las simulaciones, se han obtenido a través de catálogos de fabricantes e introduciendo sus valores en la librería de materiales del propio programa.

El programa utiliza un método híbrido para las simulaciones, aplicando a las primeras reflexiones el método de fuente imagen modificado y a las reflexiones tardías el método de las fuentes secundarias. El primero es muy fiable, pero tiene el inconveniente de que al aumentar el orden de la reflexión, el tiempo para realizar todos los cálculos se dispara. Por este motivo, sólo se utiliza con las primeras reflexiones. Además, el programa simula las pérdidas por dispersión, creando no sólo reflexiones especulares sino también reflexiones difusas. Añade la atenuación debida a la difracción, pero sólo a las primeras reflexiones. Todo ello mejora sus resultados respecto a otros métodos y con un tiempo de simulación no excesivamente alto.

4.2 CATT

Este otro programa combina características del trazado especular de conos con el trazado de rayos estándar y el algoritmo de las fuentes imagen. A diferencia del Odeon, este programa parte de un modelo virtual donde las características geométricas, la posición y características de receptores y fuentes se dan en formato de archivo de texto.

Este programa instala una aplicación en AutoCAD que permite pasar de la geometría en formato CAD a formato de texto. Crea tres ficheros diferentes:

- Un archivo con la geometría (puntos y planos), nombre de los planos y materiales con coeficientes de absorción y difusión, llamado *MASTER.GEO*.
- Otro archivo donde se definen las fuentes, su ubicación y características. Este fichero se llama *SRC.LOC*.
- Un último archivo nos permite definir en formato de texto la posición de los receptores. Este archivo se llama *REC.LOC*.

Todos estos datos se pueden modificar una vez que se empieza a trabajar con el programa.

Con este software se puede obtener los mismos parámetros que con el Odeón, por ello se consideró interesante conocer el comportamiento de ambos, tanto desde el punto de vista de resultados aportados como diferencias en cuanto a utilización, introducción del modelo o en cuanto al precio de cada uno de ellos.

5 METODOLOGÍA

Se describe a continuación [15] [16] el procedimiento que se ha seguido para estudiar y realizar las propuestas de reforma.

- 1- Realización del levantamiento con AutoCAD.
- 2- Definición y asignación de los materiales originales.
- 3- Simulación del estado original y valoración y detección de problemas de la acústica inicial de la nave central.
- 4- Propuesta de reformas (materiales y geometrías) a realizar para optimizar el acondicionamiento acústico de cada sala. Exposición de una simulación (la más representativa) de cada reforma.
- 5- Valoración final de cada propuesta de mejora.
- 6- Comparación de los dos programas comerciales.

5.1 Proceso de modelización

La modelización es un proceso por el cual la geometría de una sala es trasladada a un modelo virtual que nos permita trabajar con los programas de simulación acústica. Es un proceso sencillo en sí mismo, pero laborioso de cara a dejar el modelo sin ningún error. Para comprobar el correcto modelado de la nave, habría sido necesario tener datos de medidas in-situ, pero en este caso no ha sido posible puesto que en su día el personal de Audiotec no realizó ningún ensayo acústico. El modelo debe quedar cerrado para evitar fugas y resultados erróneos en futuras etapas del proceso de simulación.

Como documentación para la modelización se ha dispuesto de la planta del edificio, sección longitudinal y transversal, y alzados. El programa de modelado ha sido el AutoCAD 2013.

Antes de entrar en el proceso de modelización es necesario conocer cómo se deben componer las superficies para que sean reconocidas por los programas de simulación Odeon y CATT.

En primer lugar, todos los planos deben ser “caras 3D” a través del comando “3DCARA” del programa de dibujo AutoCAD 2013, y en segundo lugar todas las superficies deben ser planas, no pudiendo ser superficies alabeadas ni curvas. Dentro del programa de dibujo hay más opciones de elementos 3D, pero no se reconocerán por el programa de simulación o darán un error.

Ambos programas reconocerán estas “caras 3D”, pero con diferencias. En el caso del Odeon, sólo reconoce los planos formados por triángulos, es un proceso largo y tedioso porque hay que redibujar todos los planos y transformarlos en triángulos, mientras que el

CATT reconoce los planos independientemente de las caras que lo formen. Por ello se opta por un solo modelo formado por planos, y que estos sean triángulos por lo que no es necesario generar dos modelos por nave con el consiguiente ahorro de tiempo y esfuerzo.

El procedimiento para generar el modelo 3D de la iglesia es el siguiente:

- 1- Estudio de la documentación y confirmación de los elementos que pueden ser simplificados. La geometría debe ser lo más sencilla posible con el fin de no alargar demasiado los tiempos de cálculo y de dibujo.
- 2- Generación de un molde 3D de la iglesia. Este molde tiene todos los espesores de los muros, cristales, puertas... gracias al comando "EXTRUSIÓN" de AutoCAD aplicado al dibujo de la planta de la iglesia.
- 3- Explosión del modelo mediante el comando "EXPLOSIÓN" para quedarnos con los planos de los que están compuestos todos los elementos
- 4- Eliminación de una de las dos caras de las que estaban compuestos estos volúmenes para quedarnos con un único plano.
- 5- Redefinición de los planos con el comando "3DCARA" en triángulos.

En un primer momento se modeló la iglesia entera, pero era muy poco operativo puesto que los tiempos de simulación se alargaban mucho y si había algún error, con Odeon era muy difícil saber en cuál de las tres naves estaba. Por ello se decidió modelar las tres salas por separado, mejorando la operatividad del proceso.

A partir de este punto, la forma de convertir el modelo en AutoCAD en otro modelo que pueda ser leído por CATT u Odeon varía.

Para que el Odeón reconozca el modelo, este debe ser transformado a fichero *.dxf*. Esto se puede llevar a cabo con la opción *Guardar como...* Una vez tengamos el fichero de extensión *.dxf* el programa lo reconoce automáticamente.

Por el contrario, el CATT no "reconoce" el modelo tan fácilmente. Hay que seguir el siguiente procedimiento:

- 1- Cargar los comandos de interface entre CATT y AutoCAD en este último utilizando la opción *autolisp* de AutoCAD. Una vez cargados, no resulta complejo transformar nuestro modelo de planos y puntos válido como input para el CATT.
- 2- Ejecución del comando SETCATTSCALE para que CATT sepa la escala y en que unidades está.
- 3- Introducción de las fuentes mediante el comando SRC.
- 4- Introducción de los receptores con el comando REC.
- 5- Ejecución del comando PUT que permite ir asignando a los planos una capa para CATT y un material, al cual el programa asignará una absorción.

- 6- Ejecución del comando EXP, que transformará el modelo en ficheros de texto donde vendrán coordenadas de esquinas, planos con sus esquinas, posiciones, características, materiales...con los que podrá trabajar el programa de simulación.

5.2 Asignación preliminar de materiales

A la hora de asignar los materiales a las superficies también encontramos diferencias. Por un lado, en el Odeon tenemos un interfaz en el cual vamos señalando los planos que deseemos y les vamos asignando los materiales. Si hemos trabajado con capas en AutoCAD, la asignación de materiales será rápida puesto que veremos el nombre de las capas con el nombre de la capa de AutoCAD. En el caso del CATT, la asignación de materiales ya la hemos realizado en el AutoCAD con el comando PUT.

La introducción de los valores de absorción y difracción de los materiales se ha realizado "a mano". Gracias al hallazgo de un documento [1] donde se documenta la iglesia, se ha podido conocer los materiales de la misma (en este mismo documento se pueden encontrar gran cantidad de imágenes de la misma, y en internet hay disponibles videos [17] [18] con vuelos de drones donde se puede visualizar un vuelo sobre la iglesia). A continuación se hará una descripción de los materiales constructivos asignados al estado original con los coeficientes de absorción acústica de la capa que constituye la piel de la iglesia y por tanto que influye en la simulación acústica.

- **Paredes y techo:** mortero de cal

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06

- **Suelo:** ladrillo visto

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05

- **Vigas y viguetas de la cubierta:** madera barnizada

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

- **Coro y pilares del coro:** madera barnizada

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

- **Retablo:** madera pintada

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07

- **Ventanas:** vidrio

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06

5.3 Asignación de fuentes

En el caso de la elección de las fuentes para las simulaciones, se ha optado por las que sean lo más parecido a cada uno de los usos reales que se le vaya a dar a cada una de las salas.

En la sala lateral derecha (palabra) se ha optado por una fuente que imita la voz humana en un tono elevado ($L_p = 77$ dB a 1 m).

En la sala central (música) se ha decidido que las fuentes sean dos omnidireccionales con el fin de imitar en la medida de lo posible una sonorización más distribuida en el espacio considerado como escenario. Se ha dado un valor de 80 dB (1m) a cada una de ellas.

En la sala lateral izquierda (exposiciones) se opta por incluir tres fuentes omnidireccionales de forma repartida por la sala de 60 dB (1m) cada una. De esta manera se pretende que la emisión de cada una de ellas sea lo más parecido a un grupo pequeño de personas hablando.

5.4 Simulación del estado original de la nave central y detección de problemas

Puesto que en un estado inicial sólo existe como espacio cerrado la nave principal de la iglesia, se realizará la simulación de la misma. Los otros dos espacios simularán directamente a partir de la geometría propuesta. El procedimiento de presentación de resultados será el siguiente:

- 1- Se expondrán las gráficas del tiempo de reverberación que se han obtenido mediante el programa de simulación. Estas vienen expresadas en segundos y por bandas de octava. De toda la gama de posibilidades de representación se ha optado por trabajar con tres diferentes:
 - a- Representación de los tiempos de reverberación según los métodos estadísticos de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.
 - b- Representación de la caída de los niveles de presión sonora según el método de rayos por bandas de octava.
 - c- Representación del T_{20} y T_{30} por bandas de octava (método de rayos).
- 2- Plantas con los valores obtenidos mediante el programa de simulación del tiempo de reverberación para toda la sala en las frecuencias de 250 Hz (menor), 1.000 Hz (intermedia), y 4.000 Hz (mayor) expresado en segundos.
- 3- Planta con los valores obtenidos mediante el programa de simulación del tiempo del nivel de presión sonora ponderado A para toda la sala expresado en decibelios A.
- 4- Plantas con los valores obtenidos mediante el programa de simulación de la claridad musical (C80) para toda la sala expresada en decibelios.
- 5- Evaluación del estado acústico inicial de la nave principal.

5.4.1 Tiempos de reverberación

Como parámetro fundamental en el estudio de la acústica de salas, se presentan los resultados del tiempo de reverberación por el método estadístico y por el método de rayos.

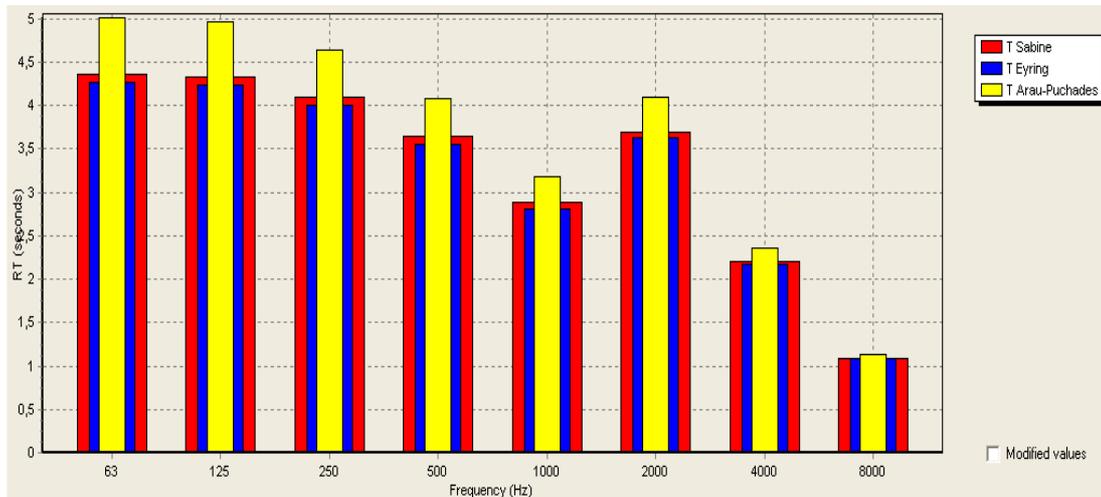


Figura 13.- Tiempo de reverberación de la nave central en su estado inicial según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.

En este caso, los cálculos han sido realizados por el programa mediante los métodos de la acústica estadística. El tiempo calculado (figura 13) según el método de Arau-Puchades es el más alto de los tres, el siguiente más alto sería el de Sabine y el más bajo corresponde al de Eyring.

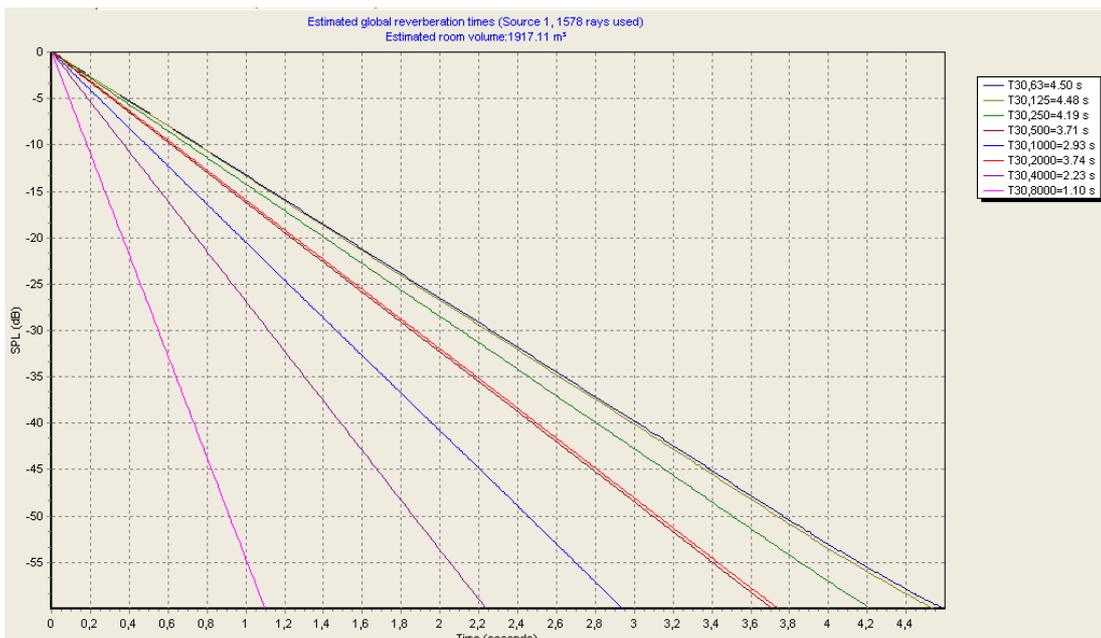


Figura 14.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB de la nave central en su estado inicial.

En el caso de la caída de niveles (figura 14), se observa como estas caídas estimadas son muy lineales, con valores entre los 2,23 segundos para la frecuencia de 4.000 Hz y los 4,19 segundos para la frecuencia de 250 Hz. Esta linealidad en la caída provocará que la diferencia entre el T_{30} y el T_{20} sea muy pequeña (figura 15), puesto que las caídas de referencia para estos parámetros serán proporcionales.

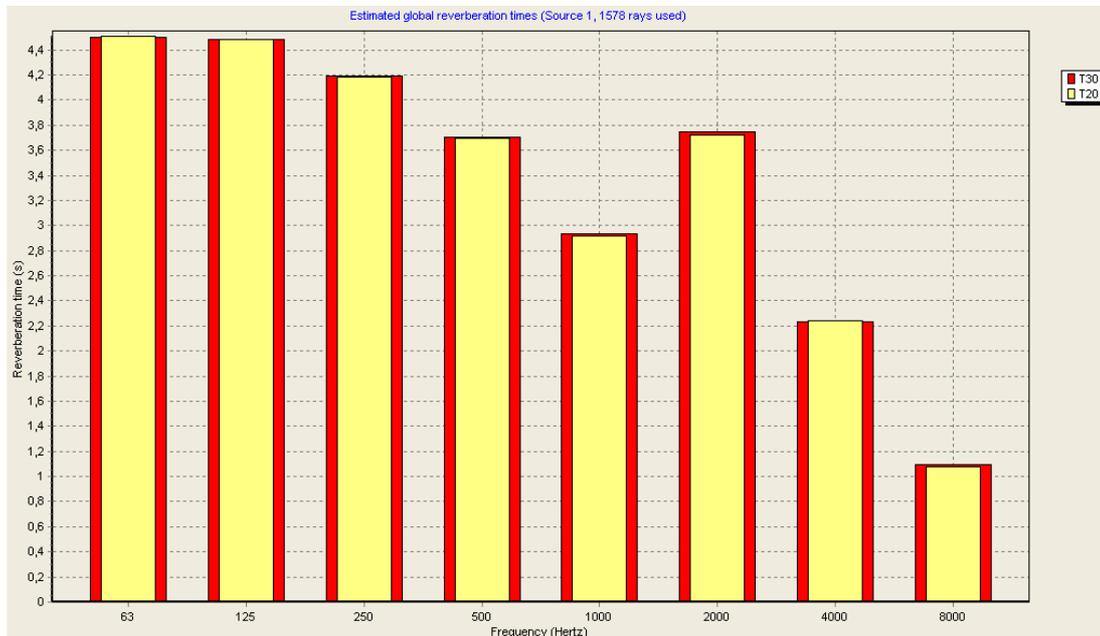


Figura 15.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (T_{30}) y una caída de 20 dB (T_{20}) en bandas de octava.

5.4.2 Tiempos de reverberación en la nave

A continuación se presentan los resultados para el tiempo de reverberación, pero en diferentes puntos de la sala.

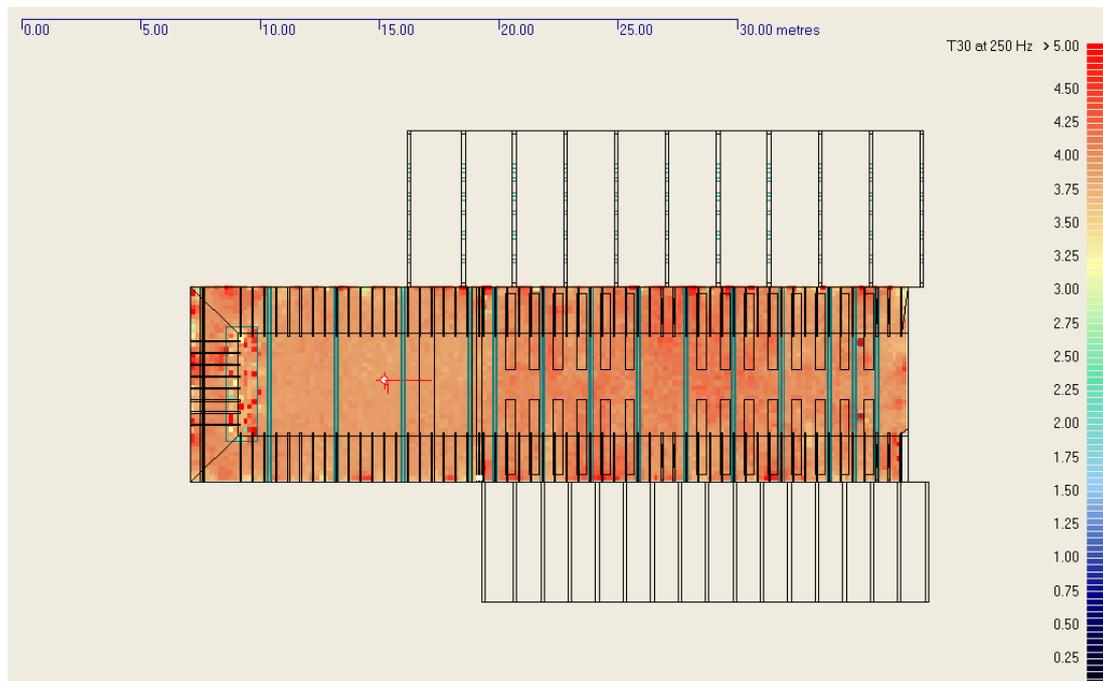


Figura 16.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 250 Hz.

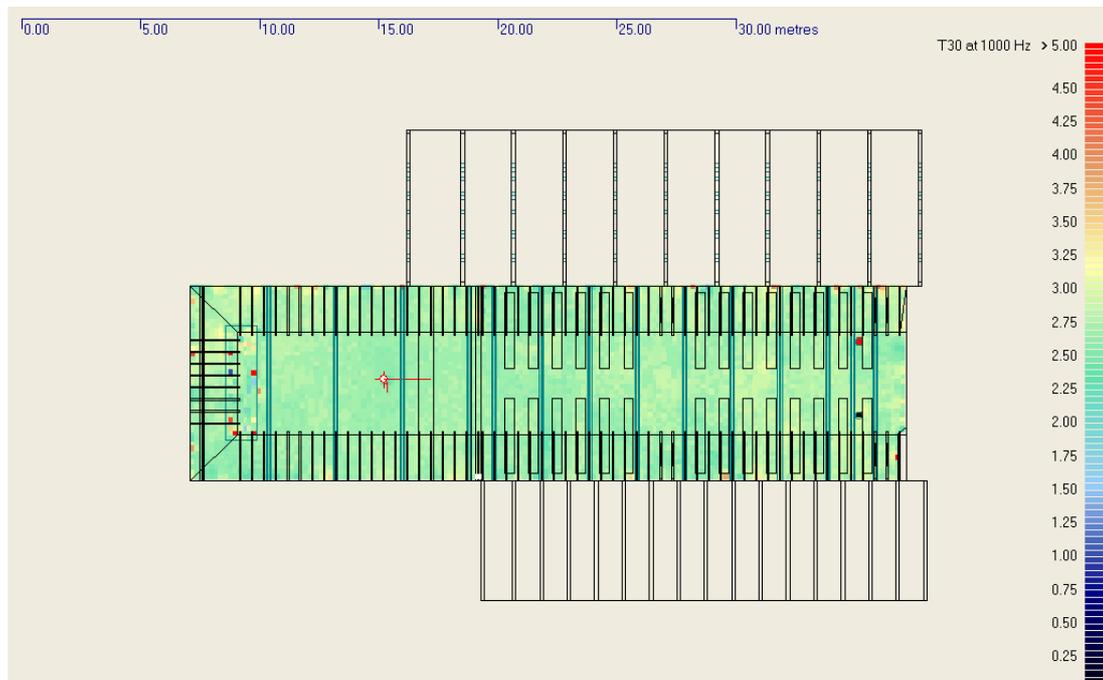


Figura 17.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 1.000 Hz.

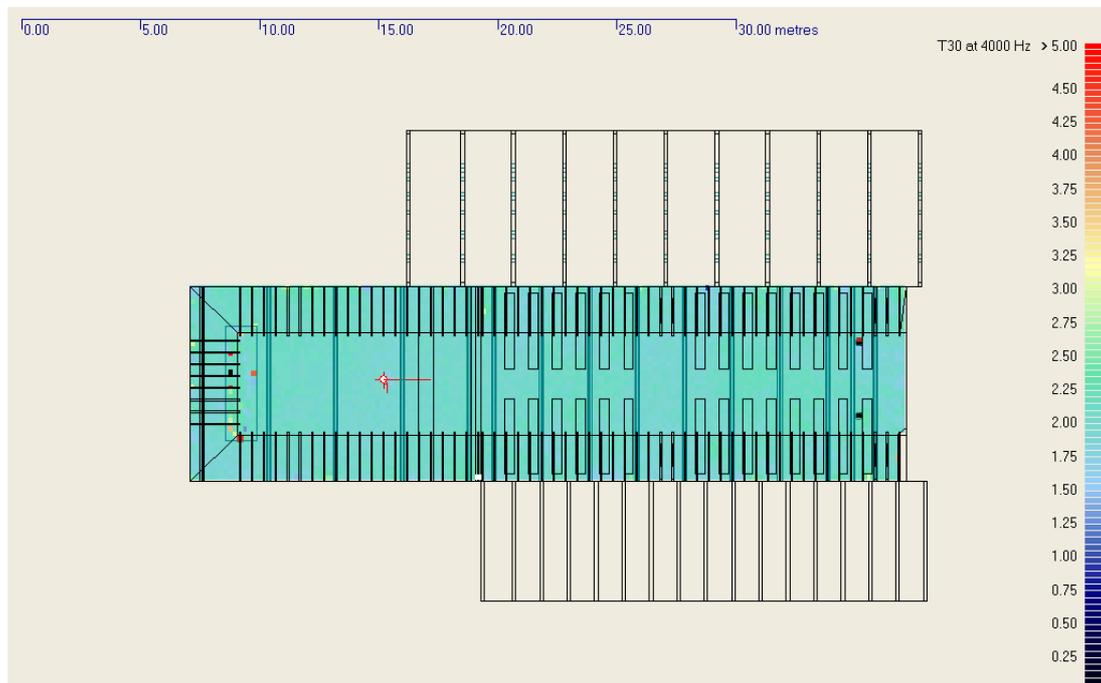


Figura 18.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (T_{r30}) en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 4.000 Hz.

Son valores muy homogéneamente distribuidos por la nave, pero son valores muy elevados para el uso que se le pretende dar a la nave central, considerando que se destinará al uso de música de cámara. Estos valores son similares al T_{30} para cada frecuencia.

5.4.3 Nivel de presión sonora con ponderación A

La distribución resulta homogénea, no variando los resultados más allá de los 5-6 dBA entre puntos situados en la parte delantera y en la parte trasera de la audiencia pero podrían realizarse mejoras para que resultasen los niveles más homogéneos aún.

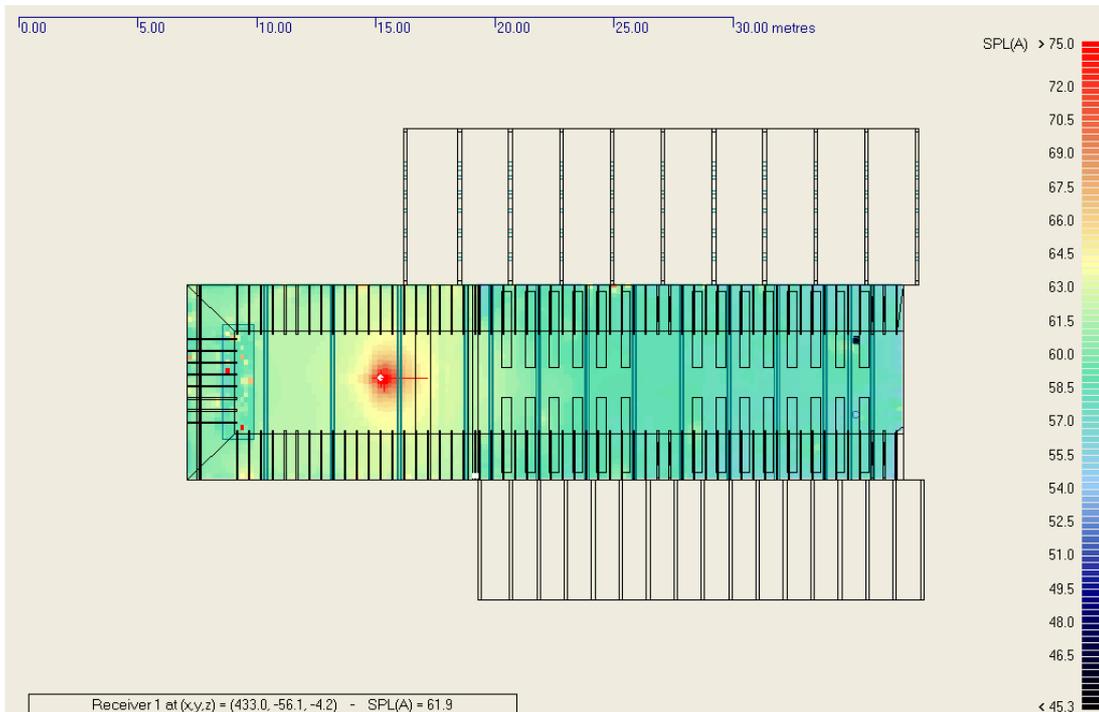


Figura 19.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la nave central.

5.4.4 Claridad musical

Se aportan a continuación los valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave.

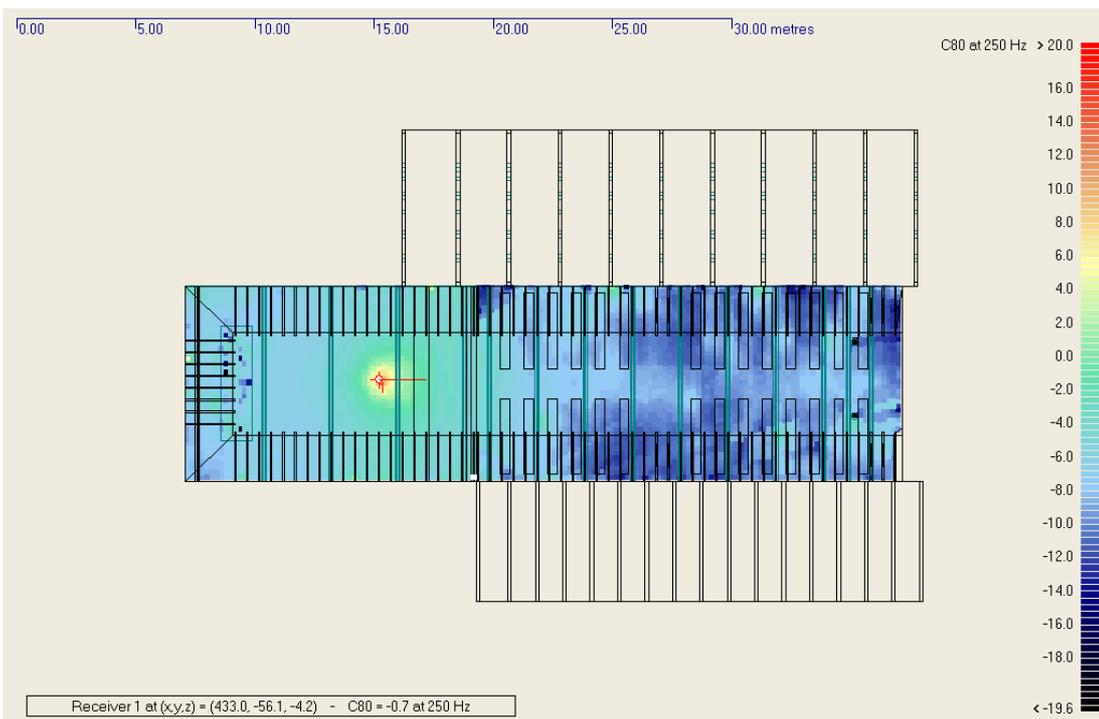


Figura 20.- Valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 250 Hz.

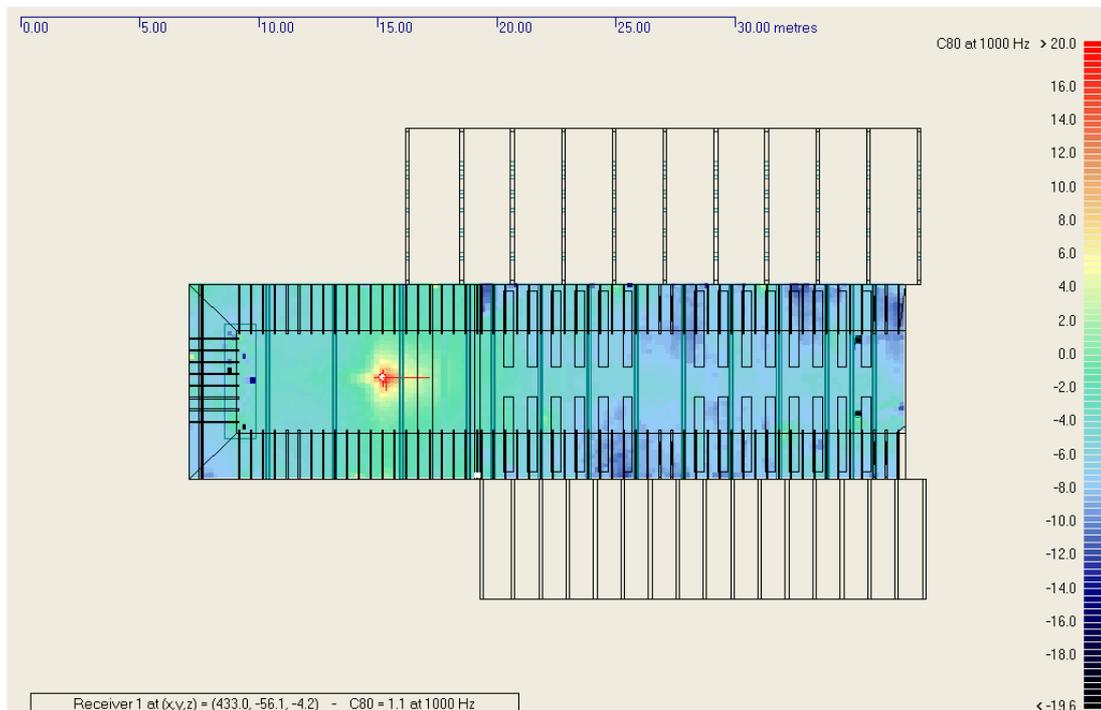


Figura 21.- Valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 1.000 Hz.

La claridad también está regularmente distribuida por la nave, pero tiene unos valores inadecuados para el uso de la música. En este caso se encuentran entre -2 dB y -11 dB,

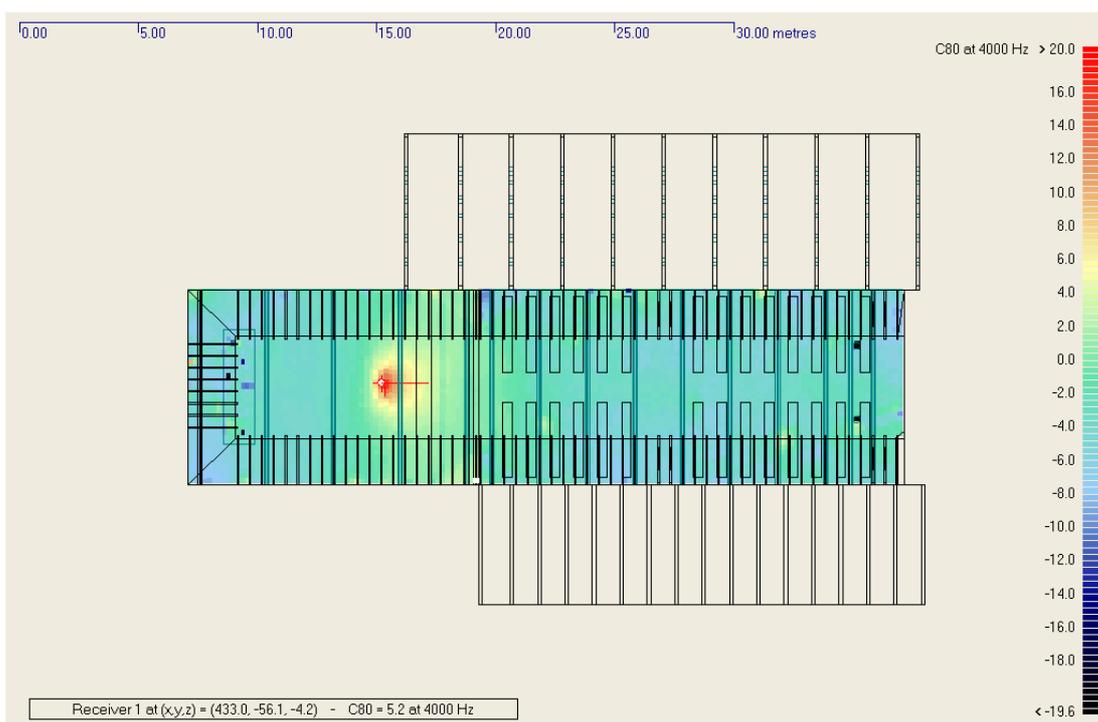


Figura 22.- Valores de la claridad musical en diferentes puntos de la nave central para una frecuencia de 4.000 Hz.

lejos de los valores fijados como objetivos (entre -2 dB y 2 dB).

5.4.5 Evaluación del estado inicial

Los resultados obtenidos después de la simulación inicial arrojan diferentes lecturas. Por un lado, se observa que los niveles de presión sonora en el interior de la nave son correctos y con una distribución homogénea dentro de la misma. Por otra parte, los resultados obtenidos del tiempo de reverberación y claridad musical distan mucho de los recomendados para una correcta acústica de la sala para su uso concreto. Por ello las mejoras deben tener los siguientes objetivos:

- 1- Reducción del tiempo de reverberación en todas las frecuencias.
- 2- Mejora de la distribución y de los valores de los niveles de presión sonora.
- 3- Mejora de los niveles de claridad musical en la zona de la audiencia.

Parámetro \ Sala	Valores objetivo	Valores obtenidos	Cumplimiento
Tr (s)	1,3 – 1,7	3,5	No cumple
EDT (s)	1,3 – 1,7	3,5	No cumple
C₈₀	-2 dB ≤ C ₈₀ ≤ +2 dB	-11 dB ≤ C ₈₀ ≤ -2 dB	No cumple

Tabla 3.- Evaluación del cumplimiento de los objetivos para la nave central en su estado original.
Elaboración propia.

5.5 Búsqueda y elección de materiales

Una vez realizada la primera simulación para conocer el estado inicial de la nave central, se puede empezar a trabajar en la búsqueda de materiales para las propuestas de reforma de esta nave y para el rediseño de los dos patios laterales. Como se ha comentado en la introducción, se dispone de total libertad para configurar los dos patios laterales y convertirlos en dos salas, una de conferencias y otra de exposiciones.

A la hora de la elección de materiales se va a priorizar que estos se puedan adquirir en empresas de la propia ciudad, y en la medida de lo posible, que sean lo más ecológicos que se pueda.

Después de un periodo de búsqueda de diferentes empresas que ofrecen servicios de acústica en la ciudad de Cali, se ha comprobado que son escasas y no disponen de muchos materiales en el campo de la acústica. Se ha elegido la empresa Acústica Integrada por que se ha observado que es la que dispone de una mayor gama de materiales para acondicionamiento acústico. Su página es la siguiente:

<http://www.acusticaintegrada.com/>

Para la reforma se ha decidido utilizar un reflectante para enviar sonido a las últimas filas mediante reflexiones y un material absorbente que permita disminuir el tiempo de reverberación allí donde sea necesario.

Dentro de la gama de productos de “acústica integrada” se ha optado por la elección de los siguientes materiales para su puesta en servicio:

- **Material absorbente:** panel absorbente tipo arquitectónico serie PACT

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,25	0,30	0,65	0,70	0,70	0,75	0,80	0,80

- **Material reflectante:** placa de yeso laminado (marca placo)

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Coef. de absorción	0,10	0,10	0,10	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02

5.6 Simulación de las soluciones propuestas para cada espacio

5.6.1 Simulación de la sala de exposiciones

La figura 23 representa la propuesta realizada para uno de los patios laterales. Como se comenta en el punto 3 (descripción de los casos bajo estudio) se diseña esta sala pensando en que pueda ser utilizada como sala de exposiciones. Se proyecta una ventana corrida por encima del muro existente y una cubierta ligera. Por debajo de ella se descuelga un falso techo absorbente cortado en chaflán de tal manera que permita la entrada de luz natural al espacio interior. Se reserva así mismo, en la parte posterior, un espacio que pueda servir de almacén/taller para el montaje de las exposiciones.



Figura 23.- Planta y sección longitudinal de la propuesta de sala de exposiciones. Elaboración propia.

La metodología de presentación de resultados será similar a la seguida para la simulación de la nave central en su estado original (ver página 42), con las siguientes modificaciones:

- 1- Las frecuencias para esta simulación serán 500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz.
- 2- Se presentarán los resultados del tiempo de reverberación (T30) y de los niveles de presión sonora con ponderación A.

En cuanto a la materialidad de la sala, después de la realización de dos simulaciones de prueba que no daban los resultados esperados, se tienen los siguientes elementos:

- 1- Falso techo de material absorbente (76,00 m²)

- 2- Pared trasera de cierre del almacén en material absorbente (15,00 m²)
- 3- Paneles de exposición de placas de teso laminado, con dos paneles de material absorbente (3,30 m²)
- 4- Bancos corridos en madera barnizada
- 5- Las paredes de cal y el suelo de ladrillo mantienen los materiales.

5.6.1.1 Tiempos de reverberación

Como se ha comentado anteriormente, el tiempo de reverberación es un parámetro clave, y a continuación se muestran sus resultados.

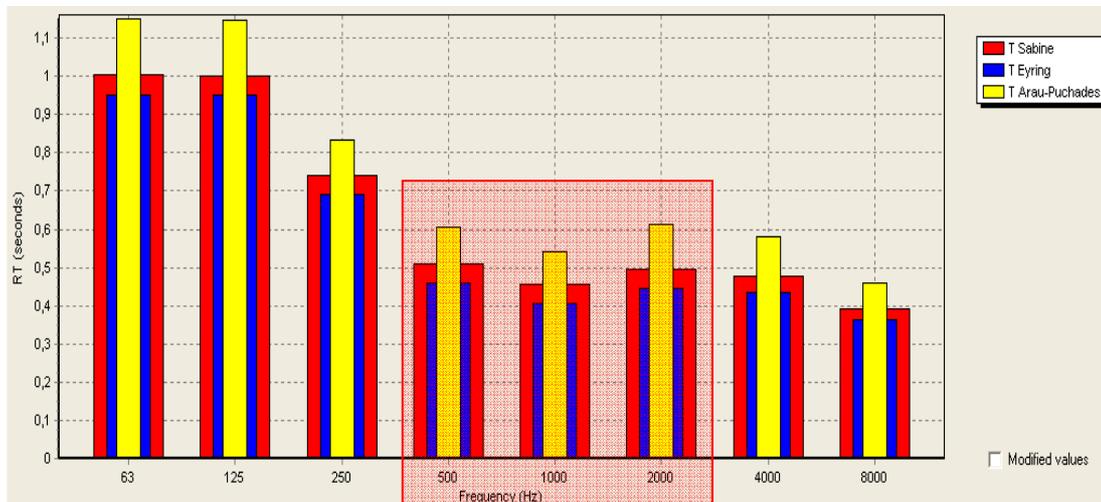


Figura 24.- Tiempo de reverberación de la sala de exposiciones según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.

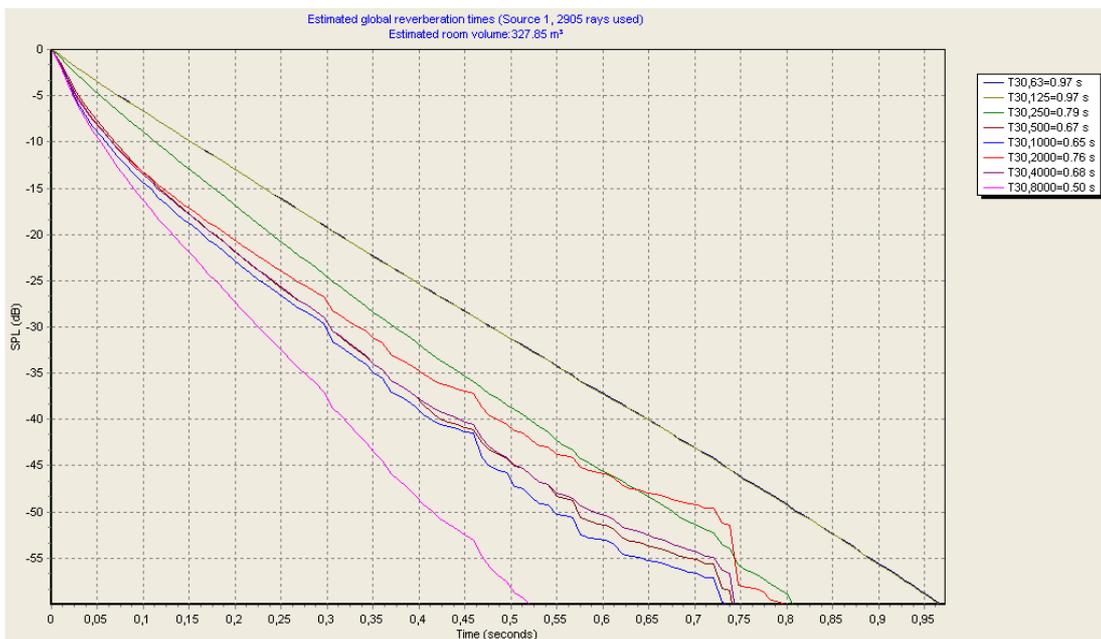


Figura 25.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB en la sala de exposiciones.

En este caso, los cálculos han sido realizados por el programa mediante los métodos de la acústica estadística. El tiempo calculado (figura 24) según el método de Arau-Puchades es el más alto de los tres, el siguiente más alto sería el de Sabine y el más bajo corresponde al de Eyring. Estas diferencias aparecen porque la forma de realizar los cálculos en cada caso varía.

En el caso de la caída de niveles (figura 25), se observa como estas caídas no son tan lineales como sería de esperar, con valores entre los 0,76 segundos para la frecuencia de 2.000 Hz y los 0,67 segundos para la frecuencia de 500 Hz. Esta falta de linealidad en la caída provocará que haya ligeras diferencias entre el T_{30} y el T_{20} (figura 26), estando estas por debajo de los 0,05 segundos, lo cual se considera despreciable.

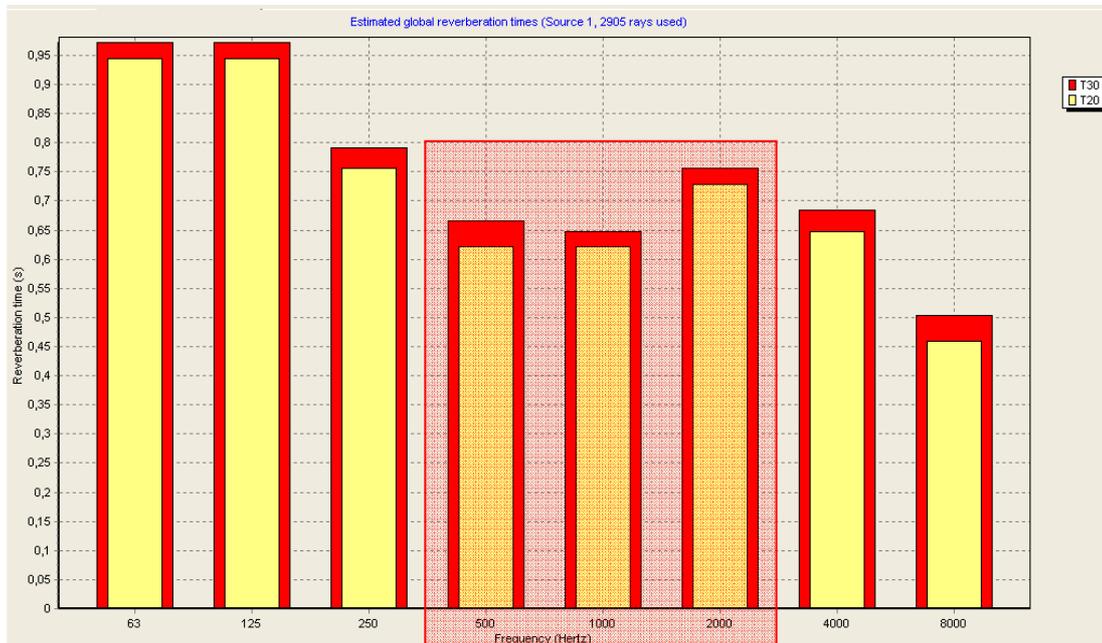


Figura 26.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (T_{r30}) y una caída de 20 dB (T_{r20}) en bandas de octava en la sala de exposiciones.

5.6.1.2 Tiempos de reverberación

Se muestran los tiempos de reverberación para diferentes puntos de la sala de exposiciones.

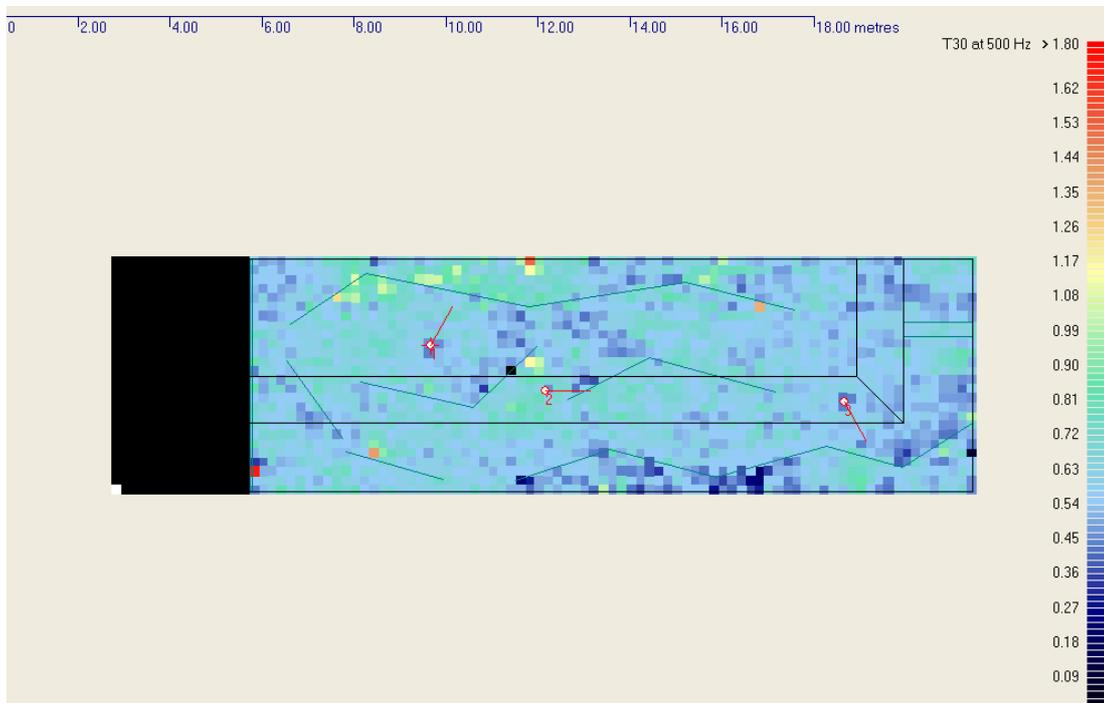


Figura 27.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 500 Hz.

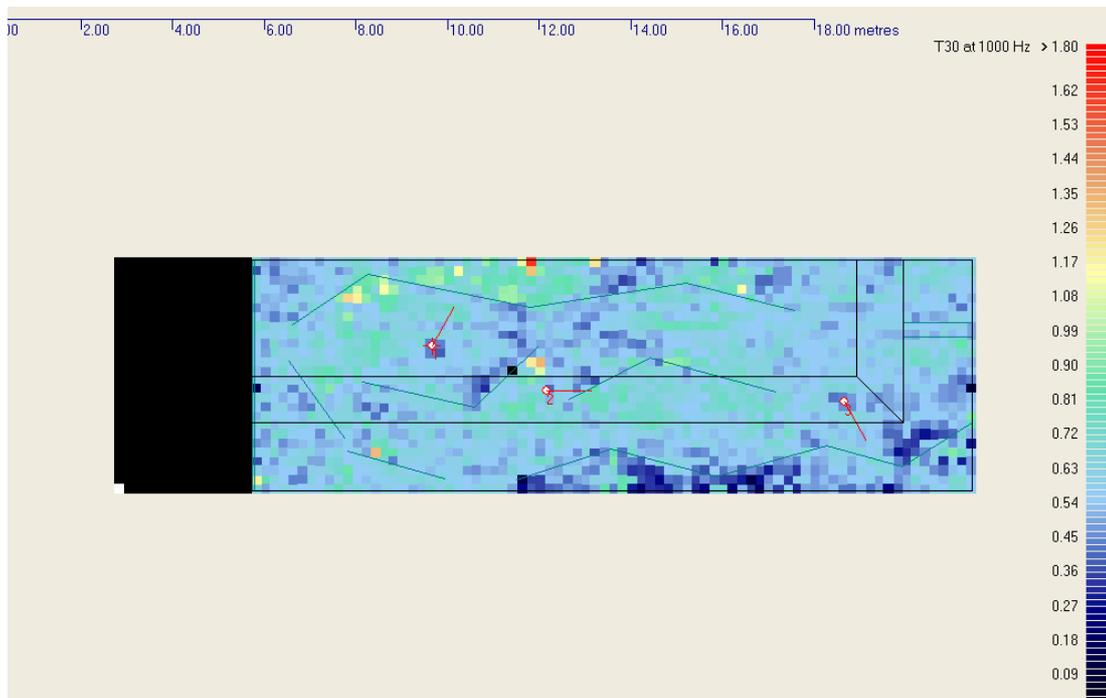


Figura 28.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 1.000 Hz.

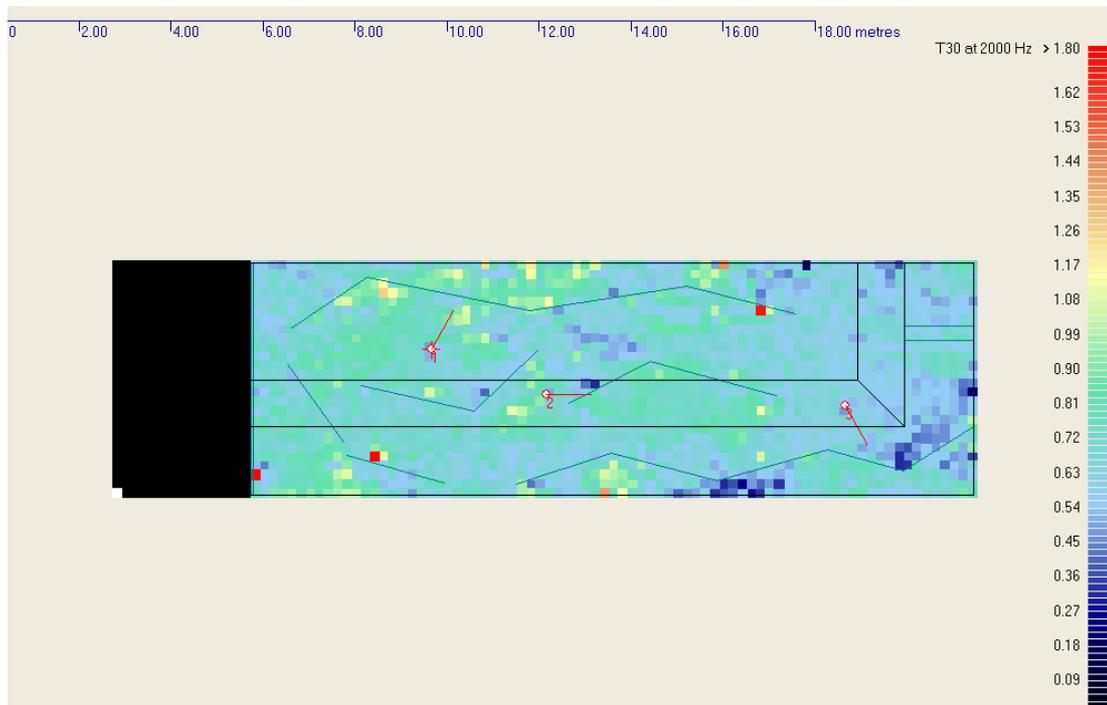


Figura 29.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la sala de exposiciones para una frecuencia de 2.000 Hz.

Son valores muy homogéneamente distribuidos por la nave, y valores óptimos para el uso que se le pretende dar a la sala de exposiciones. Se ha proyectado una sala con poca reverberación puesto que uno de los objetivos es crear cierto ambiente intimista a la hora de realizar la visita a la misma.

5.6.1.3 Nivel de presión sonora con ponderación A

La distribución resulta homogénea, no variando los resultados más allá de los 1-2 dBA. En la figura se observa el efecto pantalla de los paneles expositivos. Este efecto se produce por la situación de las fuentes en esta simulación, colocadas en esas posiciones puesto que circular por detrás de ellos no tiene sentido.

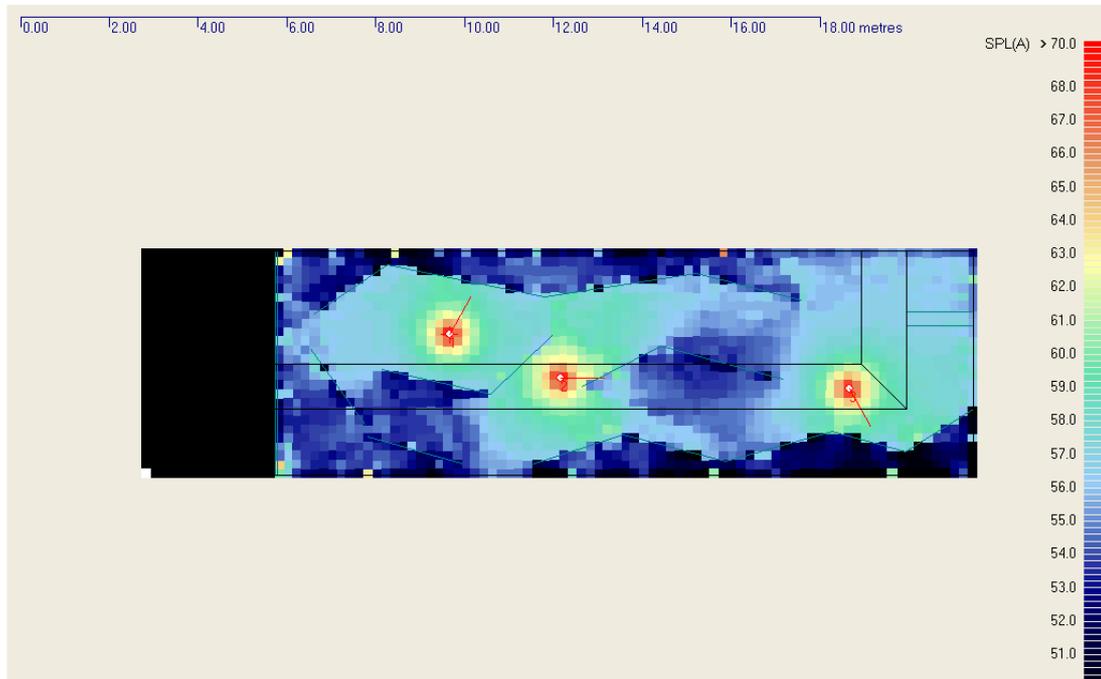


Figura 30.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la sala de exposiciones.

5.6.1.4 Evaluación del estado final

Los resultados obtenidos después de la simulación final arrojan una lectura satisfactoria. Los valores, tanto de tiempo de reverberación como los valores de los niveles de presión sonora con ponderación A, son óptimos para el uso al que se destina este espacio. El objetivo era hacer un diseño adecuado y óptimo encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico de este patio para su uso como sala de exposiciones. Este objetivo se ha conseguido, por lo que se puede concluir diciendo que con esta propuesta obtendríamos un espacio adecuado, tanto acústica como arquitectónicamente para su uso como sala de exposiciones.

Parámetro \ Sala	Valores óptimos	Valores obtenidos	Cumplimiento
Tr (s)	0,5 – 1,0	0,7	Cumple
EDT (s)	0,5 – 1,0	0,7	Cumple

Tabla 4.- Tabla-resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para la sala de exposiciones.

5.6.2 Simulación de la sala de conferencias

Al igual que el caso anterior, este espacio originalmente se trataba de un patio abierto.

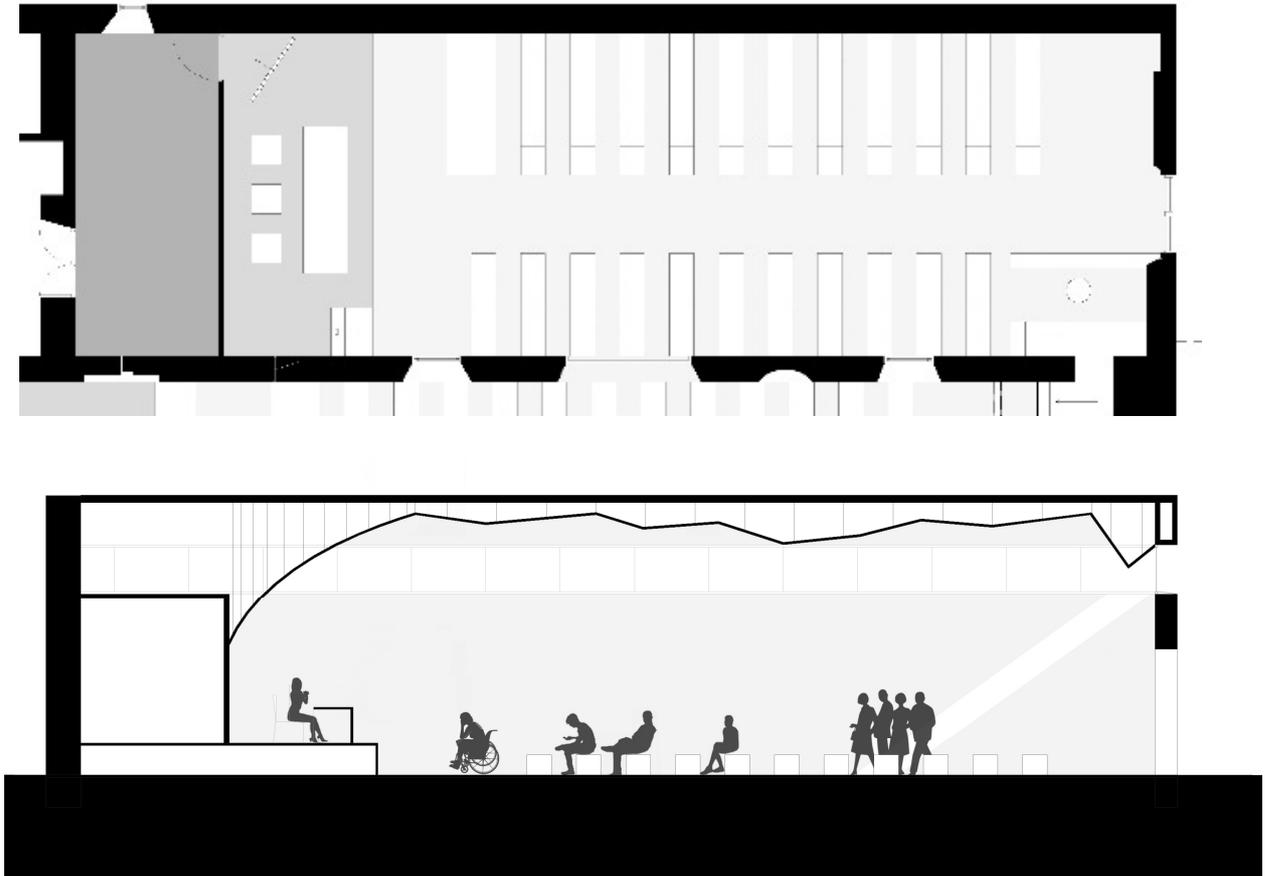


Figura 31.- Planta y sección longitudinal de la sala de conferencias. Elaboración propia.

Esta sala está dedicada al uso de la palabra y por ello el falso techo se ha diseñado de manera parcialmente equipotencial (figuras 32-37), con el fin de poner tener un reparto homogéneo de las reflexiones dentro de la sala.

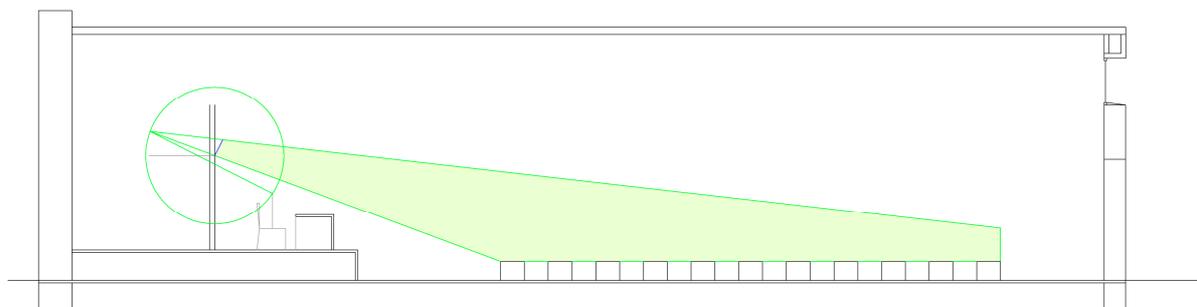


Figura 32.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos. Elaboración propia.

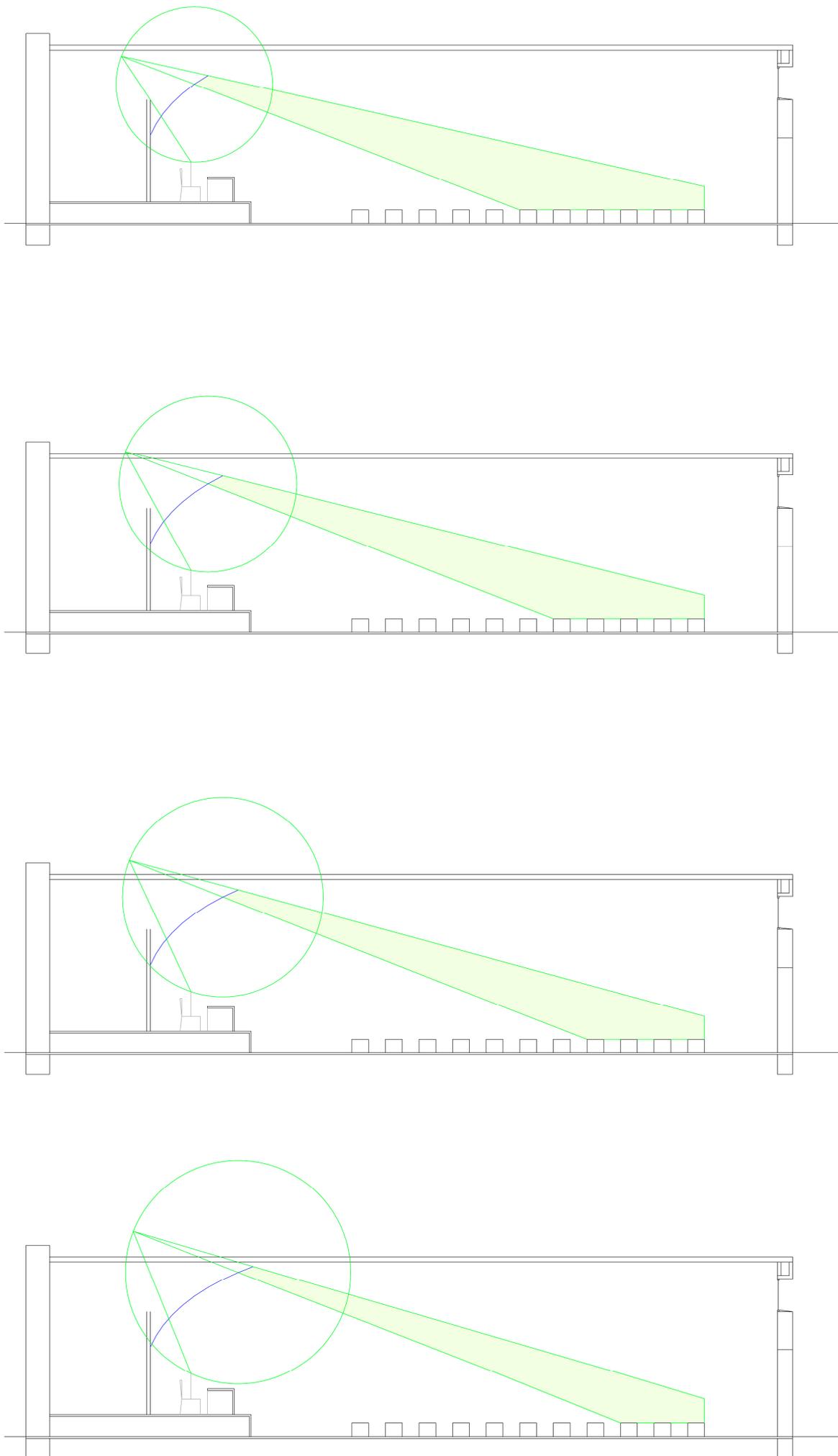


Figura 33-36.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos. Elaboración propia.

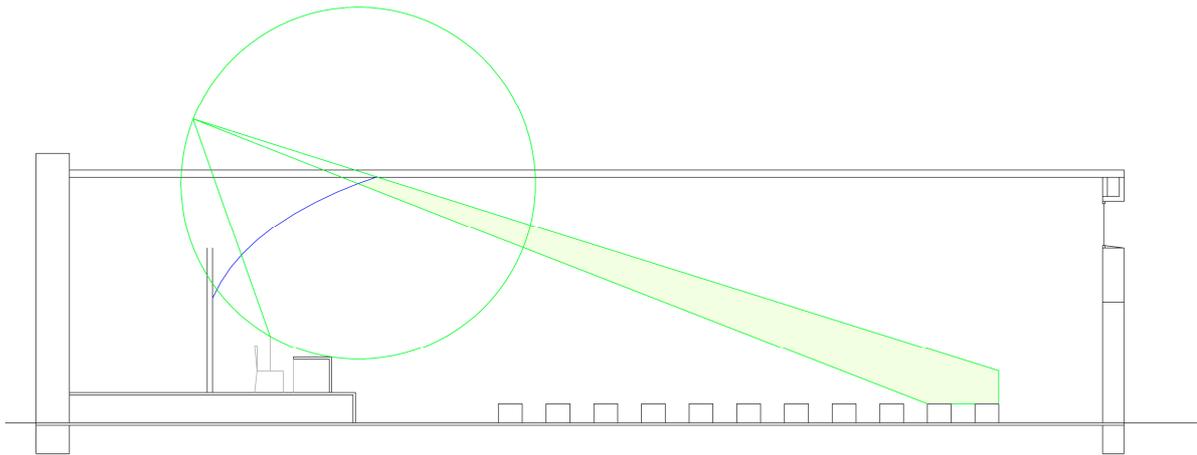


Figura 37.- Cálculo del techo equipotencial mediante el sistema de rayos. Elaboración propia.

Al igual que el caso anterior, se proyecta una ventana corrida por encima del muro existente y una cubierta ligera. Los resultados se exponen siguiendo el mismo esquema utilizado anteriormente, con las mismas frecuencias (500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz), y aportando también los parámetros de definición y STI.

En cuanto a los materiales utilizados en esta sala, después de la realización de ocho simulaciones de prueba sin resultados satisfactorios, se han obtenido los siguientes resultados:

- 1- Techo equipotencial encima del estrado en placas de yeso laminado, el resto material absorbente (99,00 m²).
- 2- Frontal del estrado y pared trasera de la zona de conferencias en material absorbente (13,80 m²)
- 3- Pared frontal al estrado en material absorbente (19,80 m²)
- 4- Puerta de acceso desde la nave central cubierta con material absorbente (4,20 m²)
- 5- Bancos corridos en madera barnizada
- 6- El resto de materiales se mantienen en su estado original: muros en cal, ventanas de vidrio, puertas de madera barnizada y suelo en ladrillo

5.6.2.1 Tiempos de reverberación

El tiempo calculado (figura 38) según el método de Arau-Puchades es el más alto de los tres, el siguiente más alto sería el de Sabine y el más bajo corresponde al de Eyring.

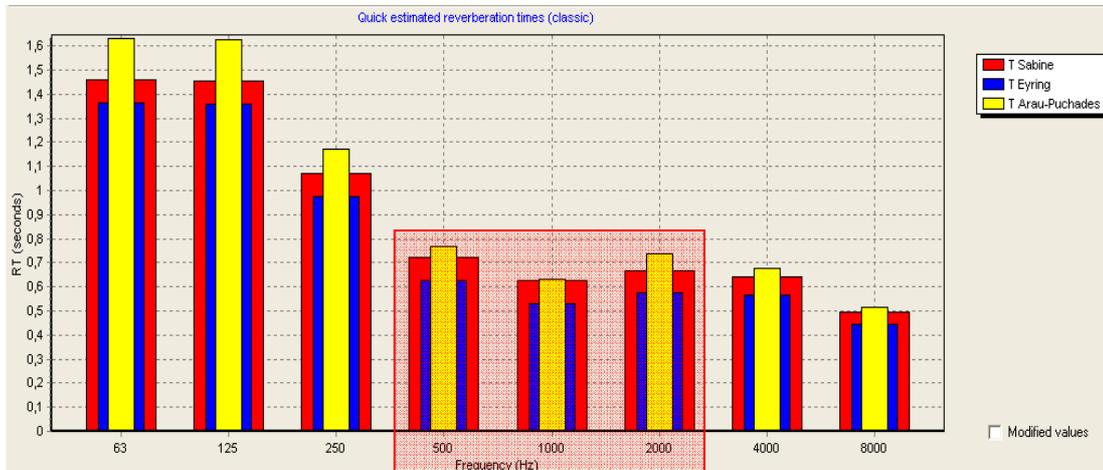


Figura 38.- Tiempo de reverberación de la sala de conferencias según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.

En el caso de la caída de niveles (figura 39), se observa muy poca linealidad, con valores entre los 1,17 segundos para la frecuencia de 2.000 Hz y los 0,85 segundos para la frecuencia de 1.000 Hz. Esta falta de linealidad en la caída provoca diferencias apreciables entre el T_{30} y el T_{20} (figura 40), estando entre 0,12 y 0,22 segundos.

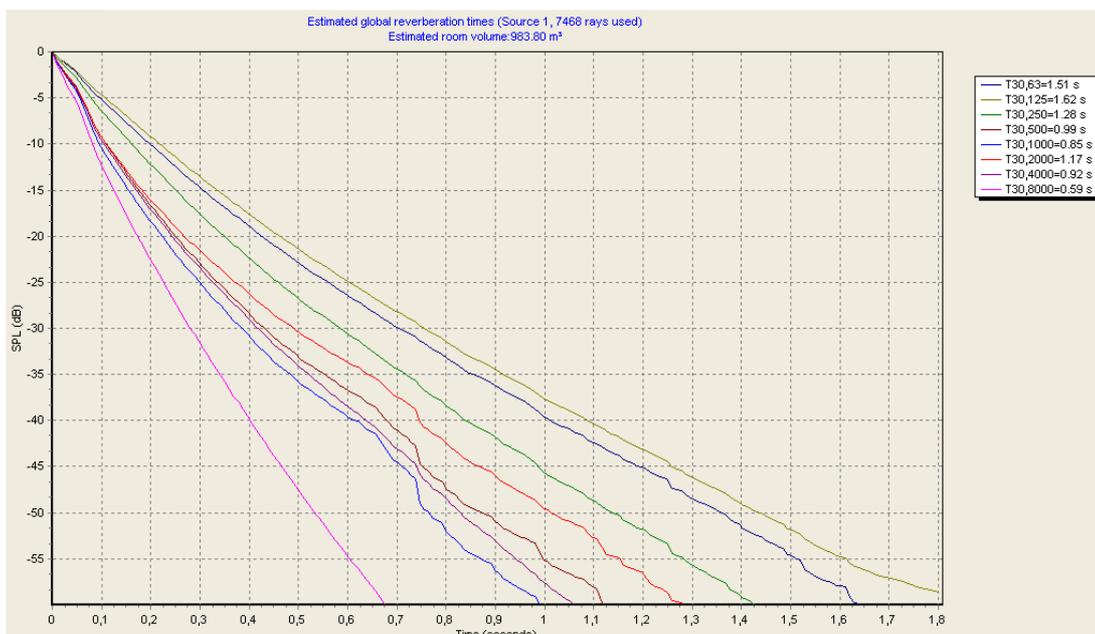


Figura 39.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB en la sala de conferencias.

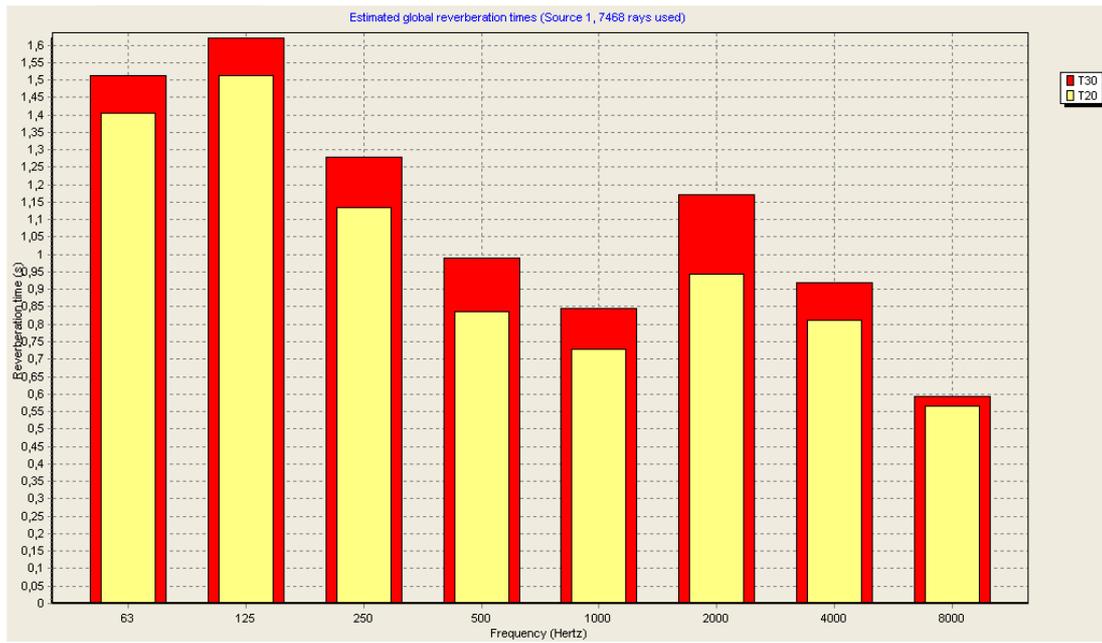


Figura 40.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) y una caída de 20 dB (Tr20) en bandas de octava en la sala de conferencias.

5.6.2.2 Tiempos de reverberación

Son valores muy homogéneamente distribuidos por la nave, y valores óptimos para el uso que se le pretende dar a la sala de conferencias.

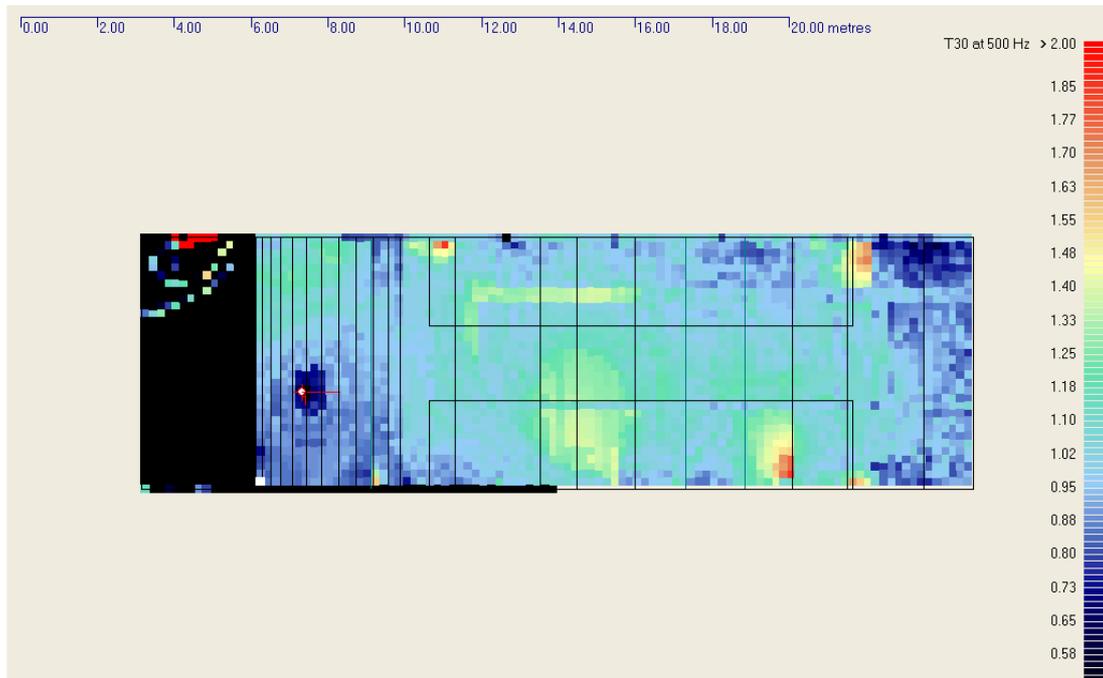


Figura 41.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 500 Hz.

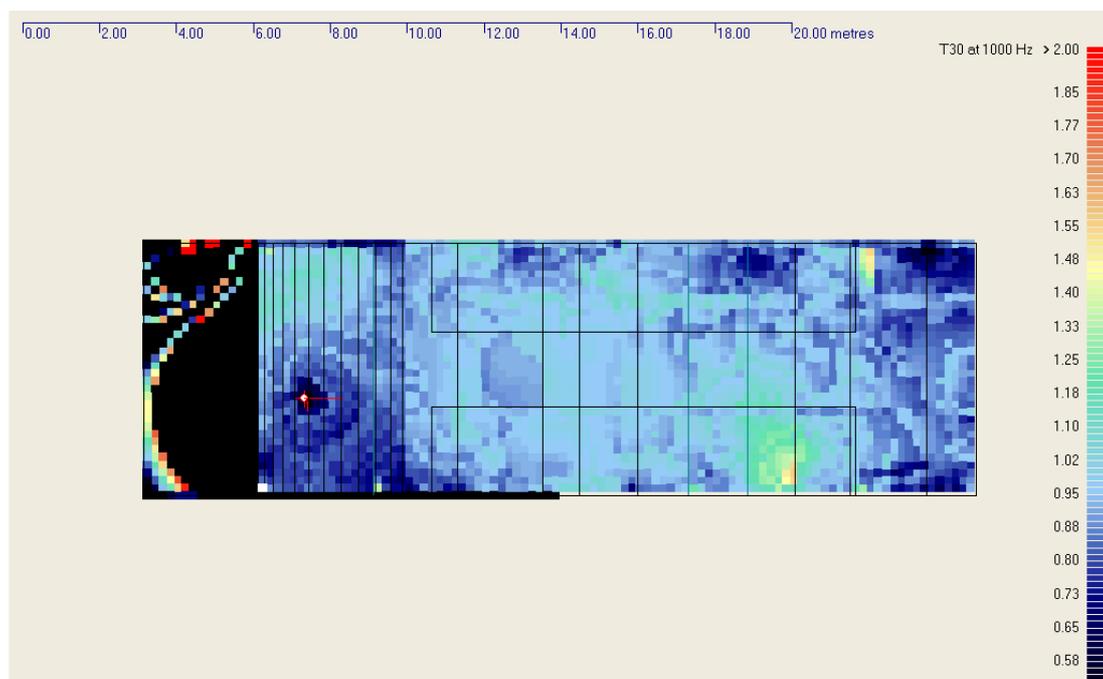


Figura 42.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 1.000 Hz.

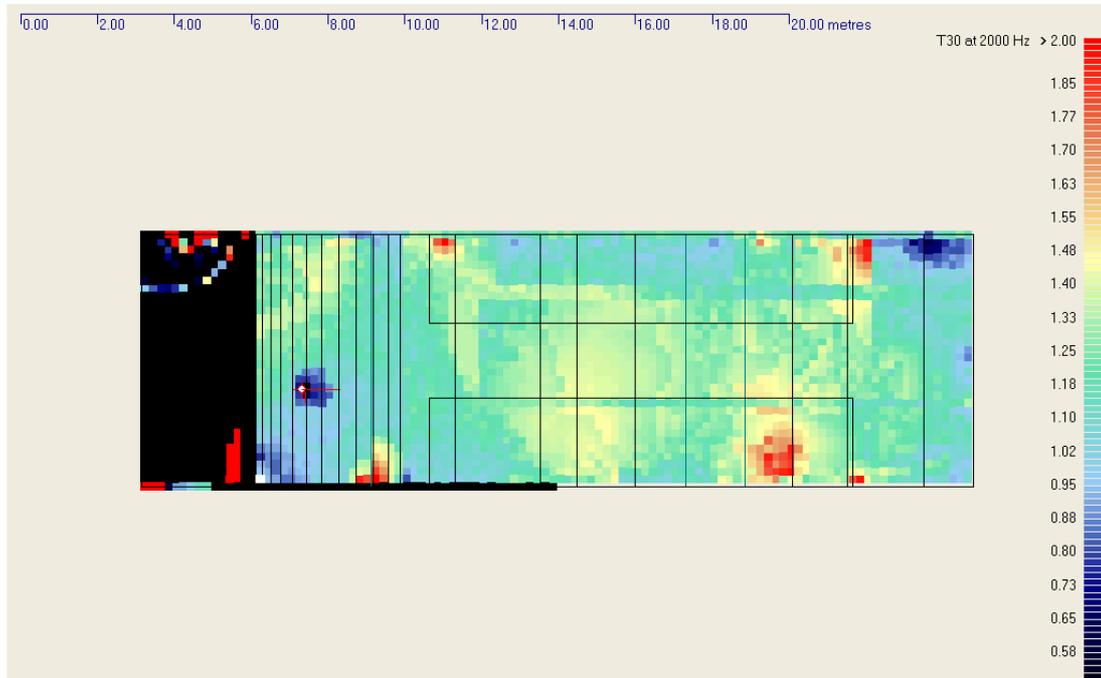


Figura 43.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 2.000 Hz.

5.6.2.3 STI

Dado que el uso principal de la sala será el lenguaje hablado (palabra), además de evaluar el tiempo de reverberación y la distribución de niveles, se incluye el STI, parámetro relacionado con la inteligibilidad de la palabra, como se ha comentado en la sección 2.2.2. Los valores del STI están todos por encima del valor límite de 0,65, por lo que se considera que la inteligibilidad es adecuada para el uso previsto.

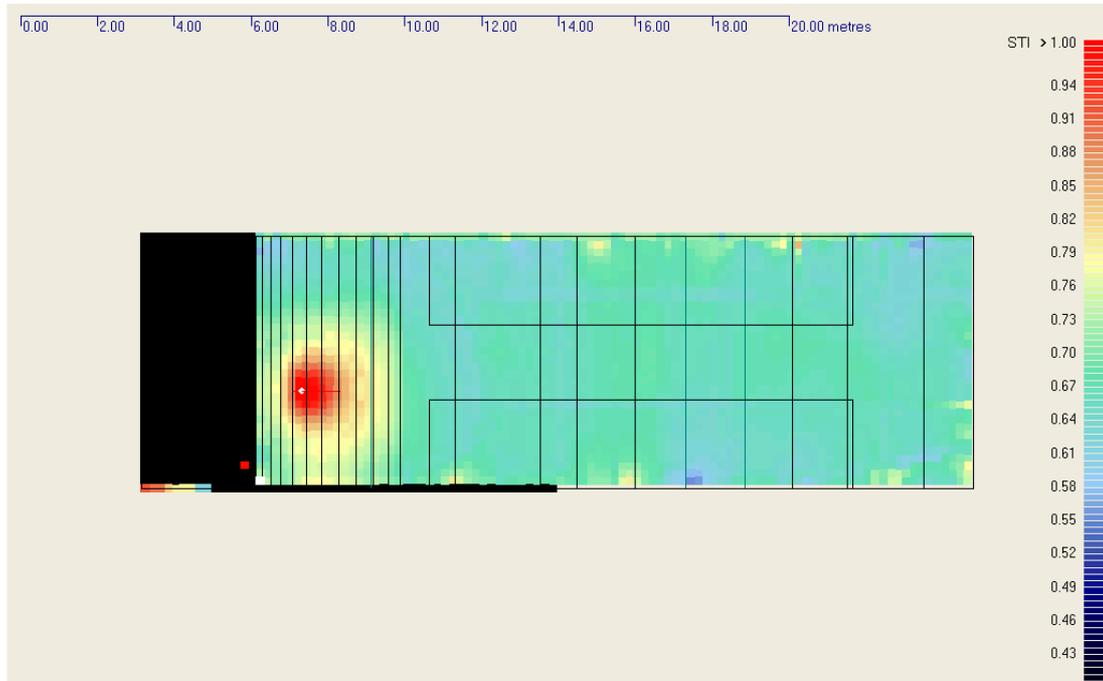


Figura 44.- Valores del STI en diferentes puntos de la sala de conferencias.

5.6.2.4 Nivel de presión sonora con ponderación A

La distribución de los niveles resulta homogénea con poca variación entre unos puntos y otros. Para evaluar la eficiencia del techo parcialmente equipotencial frente al techo plano, se han elegido tres puntos situados a 3,90 m, 7,80 m y 15,60 m de la fuente en ambos casos. En la tabla 5 se presentan los resultados con techo plano y techo parcialmente equipotencial.

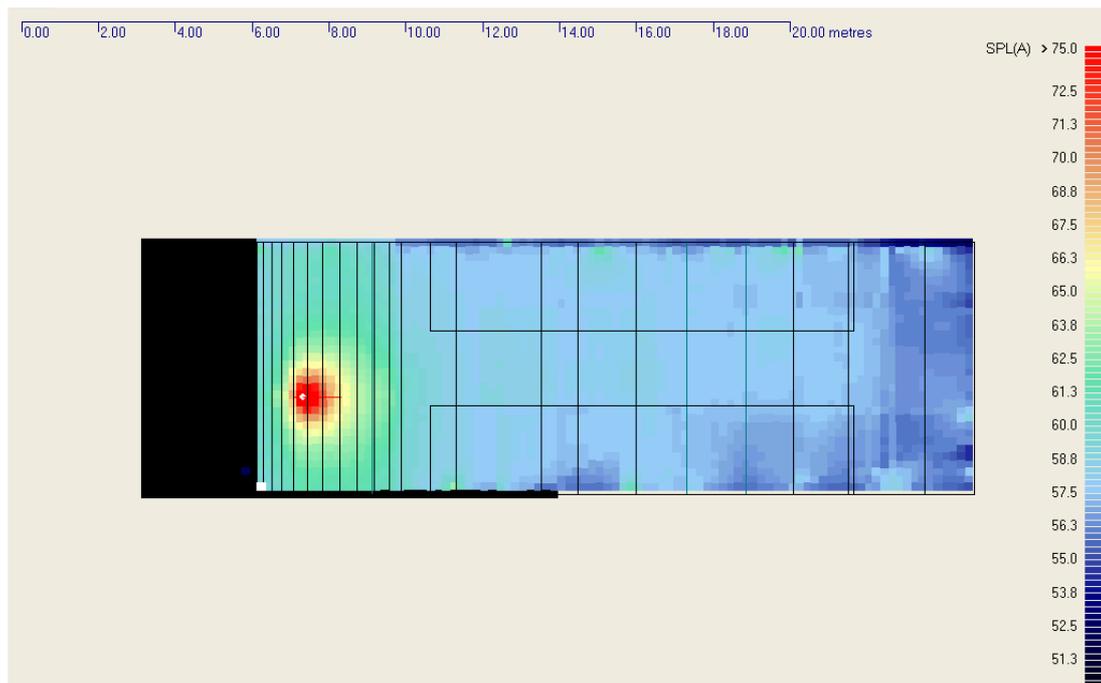


Figura 45.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos de la sala de conferencias.

Punto	Niveles techo plano (dBA)	Diferencia	Niveles techo equip. (dBA)	Diferencia
1 (3,90 m)	61,4	-	59,3	-
2 (7,80 m)	58,1	3,3	58,6	0,7
3 (15,60 m)	56,0	2,1	57,7	0,9

Tabla 5.- Valores del tiempo de reverberación en diferentes puntos de la sala de conferencias. Elaboración propia.

Como se observa, las diferencias entre los niveles son de **0,7 dBA** y **0,9 dBA** para el techo parcialmente equipotencial, y de **3,3 dBA** y **2,1 dBA** para el techo plano, por lo que se puede concluir diciendo que **se mejoran los 6 dBA** que se perderían en campo abierto al doblar la distancia a la fuente y que la presencia del techo equipotencial va a mejorar la distribución de los niveles.

5.6.2.5 Definición

A continuación se presentan los resultados de la definición para las diferentes bandas de octava. La definición, al igual que el STI, es un parámetro relacionado con la palabra. Nos da una idea de la claridad con la que llega la palabra al oyente.

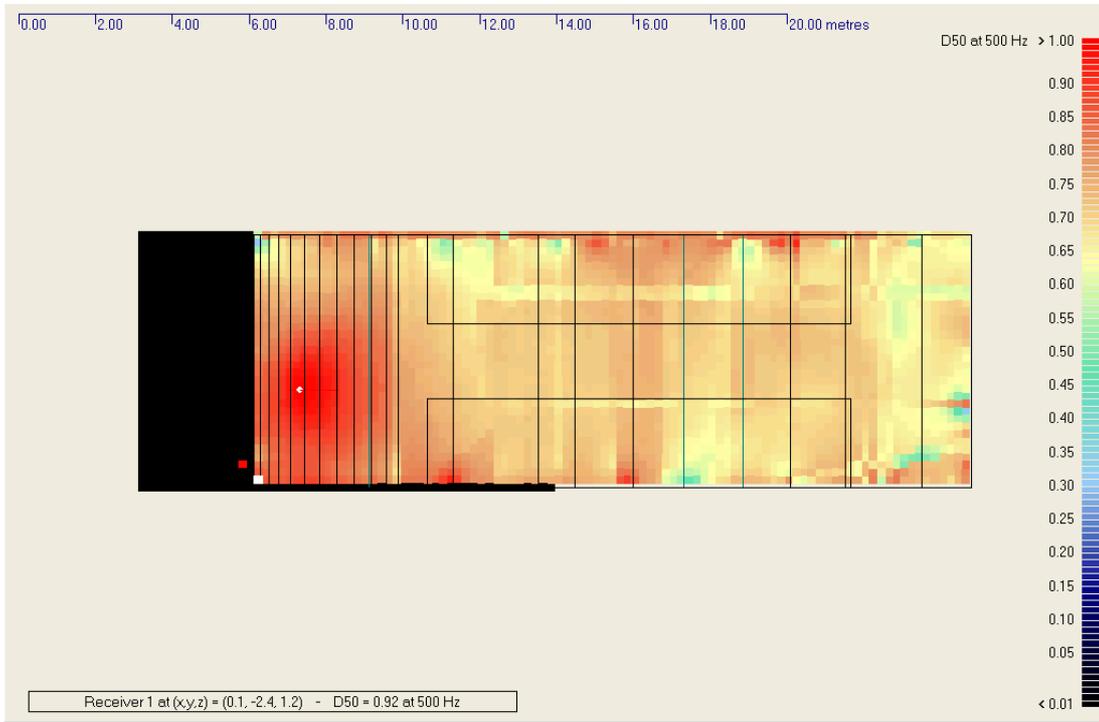


Figura 46.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 500 Hz.

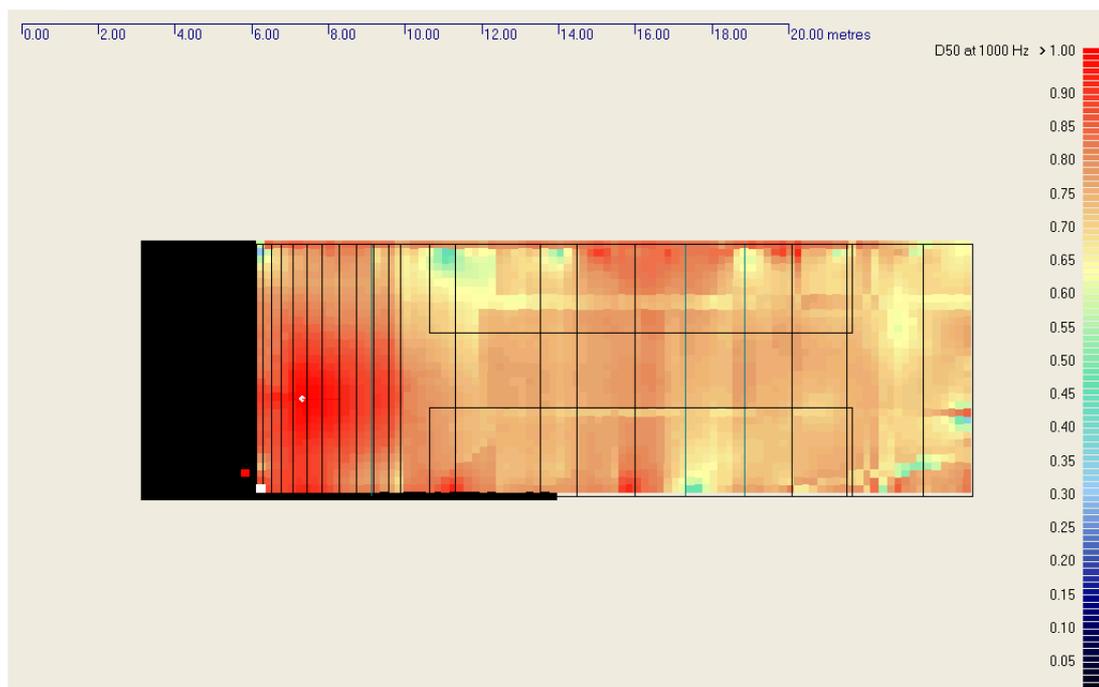


Figura 47.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una frecuencia de 1.000 Hz.

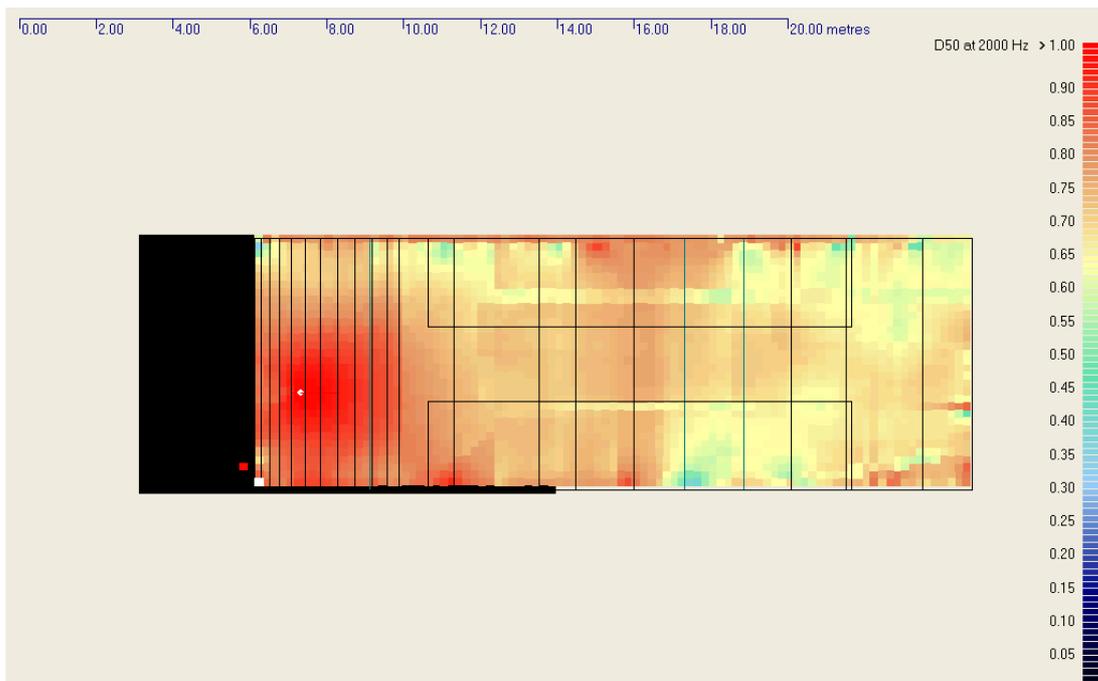


Figura 48.- Valores de la definición en diferentes puntos de la sala de conferencias para una 2.000 Hz.

Se observa una distribución homogénea de los valores, habiendo una zona de valores ligeramente más altos en la zona central de la sala. En general, los valores se encuentran por encima del mínimo recomendado, un 50%. Se puede concluir diciendo que los valores son óptimos para las necesidades de la sala.

5.6.2.6 Evaluación del estado final

Después de obtenidos los resultados de la simulación, se puede realizar una valoración objetiva de los mismos. El tiempo de reverberación y los niveles de presión sonora con ponderación A son óptimos para el uso al que se destina este espacio, teniendo estos últimos una distribución muy homogénea, lo que hace posible que haya muy buenos niveles en toda la sala, no haciendo necesario el uso de ningún elemento amplificador de sonido. El objetivo perseguido, un diseño adecuado y óptimo encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico, se ha conseguido, por lo que podemos concluir diciendo que con estas mejoras acústicas obtendríamos un espacio adecuado, tanto acústica como arquitectónicamente para su uso como sala de conferencias.

Parámetro \ Sala	Valores óptimos	Valores obtenidos	Cumplimiento
Tr (s)	0,7 – 1,0	1,0	Cumple
STI	≥0,65	0,68	Cumple
EDT (s)	0,7 – 0,9	1,0	Cumple
D ₅₀ (dB)	>50%	75%	Cumple

Tabla 6.- Tabla-resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para la sala de conferencias. Elaboración propia.

5.6.3 Simulación del auditorio

Con el fin de adaptar la nave central a un posible uso múltiple como espacio escénico (destinado especialmente a conciertos de música de cámara o grupos pequeños), esta nave va a ser reformada, siendo las mejoras las siguientes:

- 1- Construcción de una grada en pendiente que permite mejorar las condiciones acústicas y visuales del público, dejando la primera fila a las personas con movilidad reducida.
- 2- Cierre trasero del escenario. Con ello se consigue disminuir el volumen de la sala y crear dos tornavoces que reflejan el sonido sobre el escenario y las primeras filas. Detrás de este cierre se instalará una zona de almacenaje.
- 3- Creación de un chaflán trasero que permite reflejar el sonido hacia las filas traseras donde, debido a la distancia a la fuente, disminuyen los valores de los niveles de presión sonora.

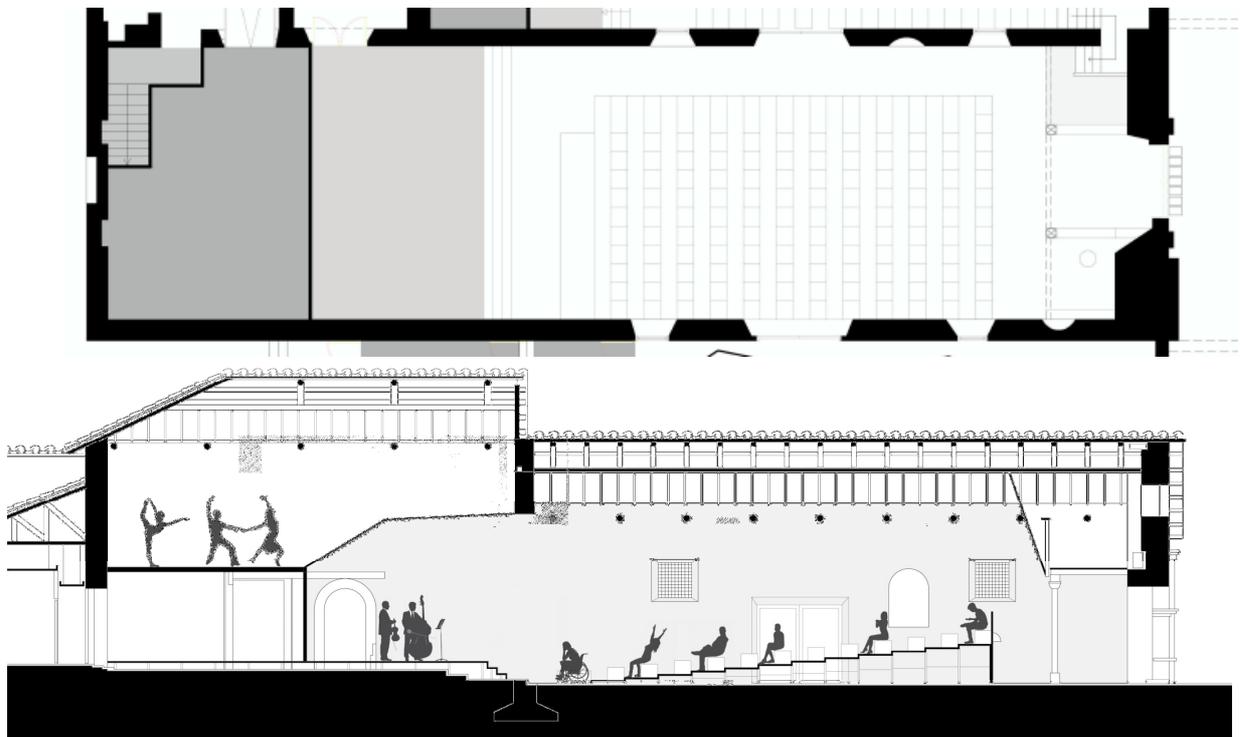


Figura 49.- Planta y sección del auditorio. Elaboración propia.

El procedimiento de presentación de resultados será el mismo que el seguido para la simulación de esta nave en su estado original, punto 5.4 (página 42).

Los materiales de la sala, después de la realización de seis simulaciones en las cuales no se observaban resultados aceptables, se han obtenido los siguientes resultados:

- 1- Tornavoz y pared de separación con el almacén en placas de yeso laminado ($33,60 \text{ m}^2$)
- 2- Panel trasero en placa de yeso laminado ($16,00 \text{ m}^2$)

- 3- Graderío con estructura metálica y bancos corridos en madera barnizada
- 4- El resto de materiales se mantienen en su estado original: muros y techo en cal, vigas y viguetas de madera, ventanas de vidrio, puertas de madera barnizada, coro en madera barnizada y suelo en ladrillo

5.6.3.1 Tiempos de reverberación

En el caso de la caída de niveles (figura 51), se observa como son bastante lineales, con valores entre los 1,12 segundos para la frecuencia de 4.000 Hz y los 1,53 segundos para la frecuencia de 250 Hz. Esta linealidad en la caída provocará que la diferencia entre el T_{30} y el T_{20} sea muy pequeña (figura 52), puesto que las caídas de referencia para estos parámetros serán proporcionales. Las diferencias entre el T_{30} y el T_{20} están en torno a los 0,1 segundos.

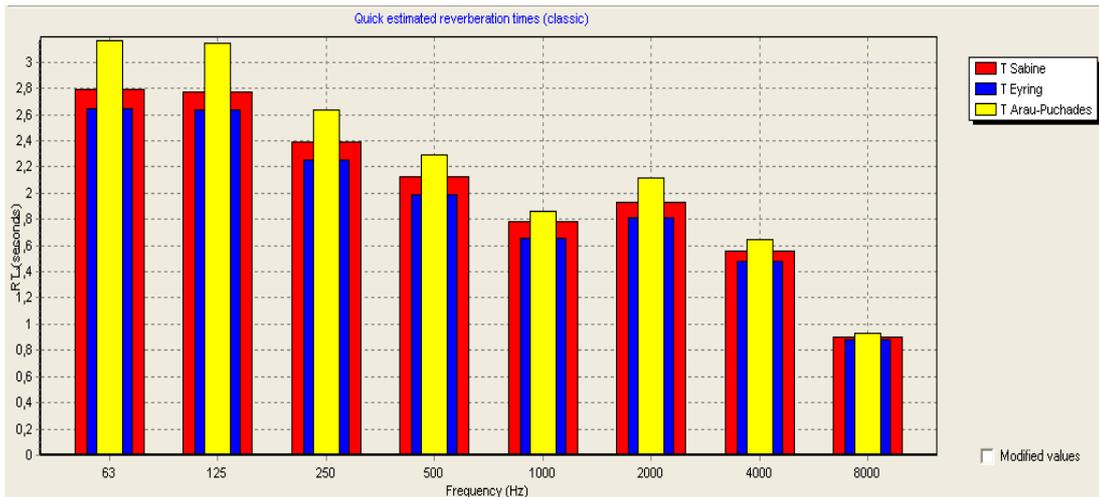


Figura 50.- Tiempo de reverberación del auditorio según el método de Sabine, Eyring y Arau-Puchades.

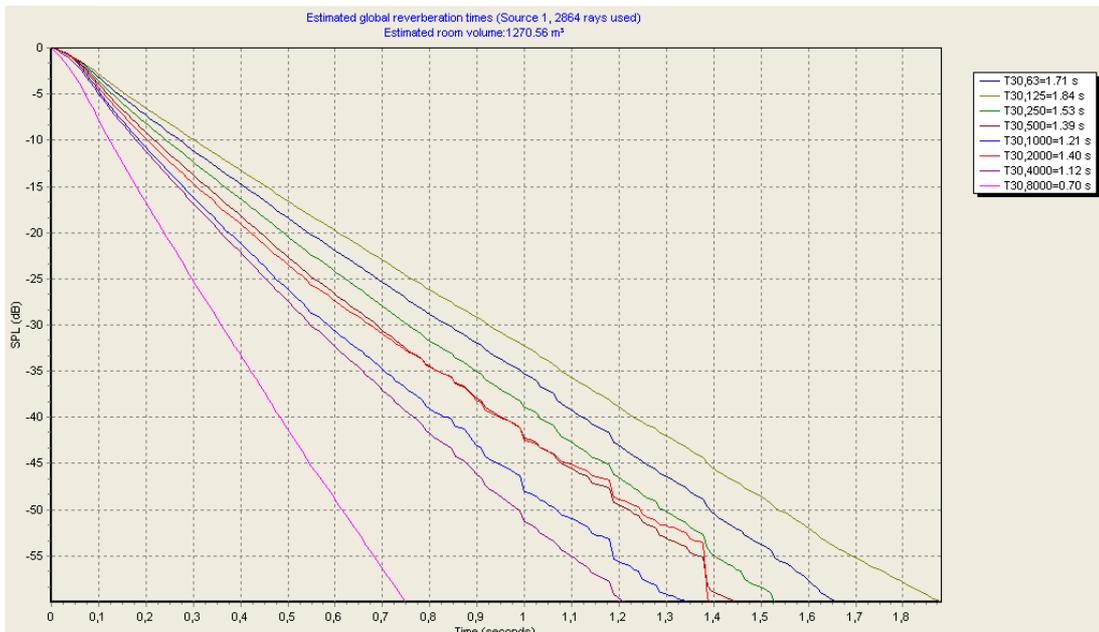


Figura 51.- Curvas de caída del nivel de presión sonora y representación del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB del auditorio.

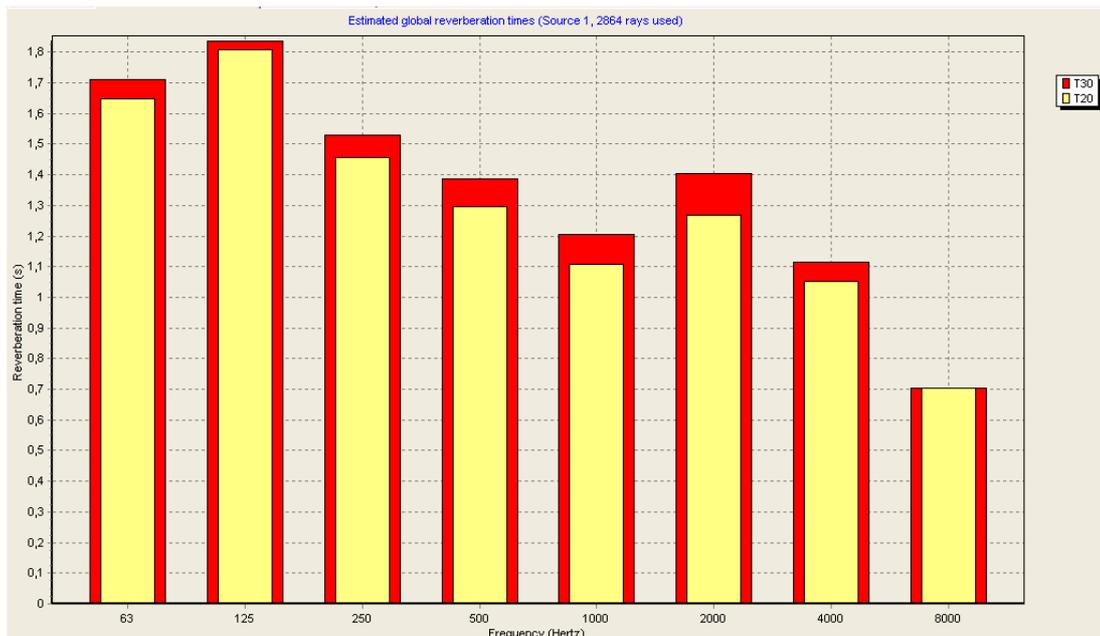


Figura 52.- Tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr30) y una caída de 20 dB (Tr20) en bandas de octava en el auditorio.

Las diferencias entre los resultados obtenidos por el método estadístico y el método de rayos (tabla 7) se fundamentan en el hecho de que para el cálculo estadístico se tienen en cuenta superficies y coeficientes de absorción, y para el de rayos la distribución en la sala de los mismos. Debido a la geometría de la sala, detrás de la grada se genera una zona cerrada por el coro, la parte trasera de la grada y los muros de cierre, que a la hora de realizar los cálculos por el método estadístico, estas superficies se tienen en cuenta (superficies y materiales), pero con el método de trazado de rayos es más complicado que las reflexiones consigan llegar a esa zona al ser tan cerrada.

	Métodos estadísticos			Métodos de rayos	
	Eyring	Sabine	Arau-Puch.	T ₃₀	T ₂₀
250 Hz	2,25	2,39	2,63	1,53	1,44
500 Hz	1,99	2,12	2,29	1,39	1,29
1.000 Hz	1,66	1,79	1,86	1,21	1,11
2.000 Hz	1,81	1,93	2,12	1,40	1,26
4.000 Hz	1,48	1,56	1,65	1,12	1,04

Tabla 7.- Comparativa entre tiempos de reverberación por el método de rayos y por el método estadístico en bandas de octava en el auditorio. Elaboración propia.

5.6.3.2 Tiempos de reverberación en la nave

Son valores muy homogéneamente distribuidos por la sala y óptimos para el uso al que se destina, al uso de música de cámara.

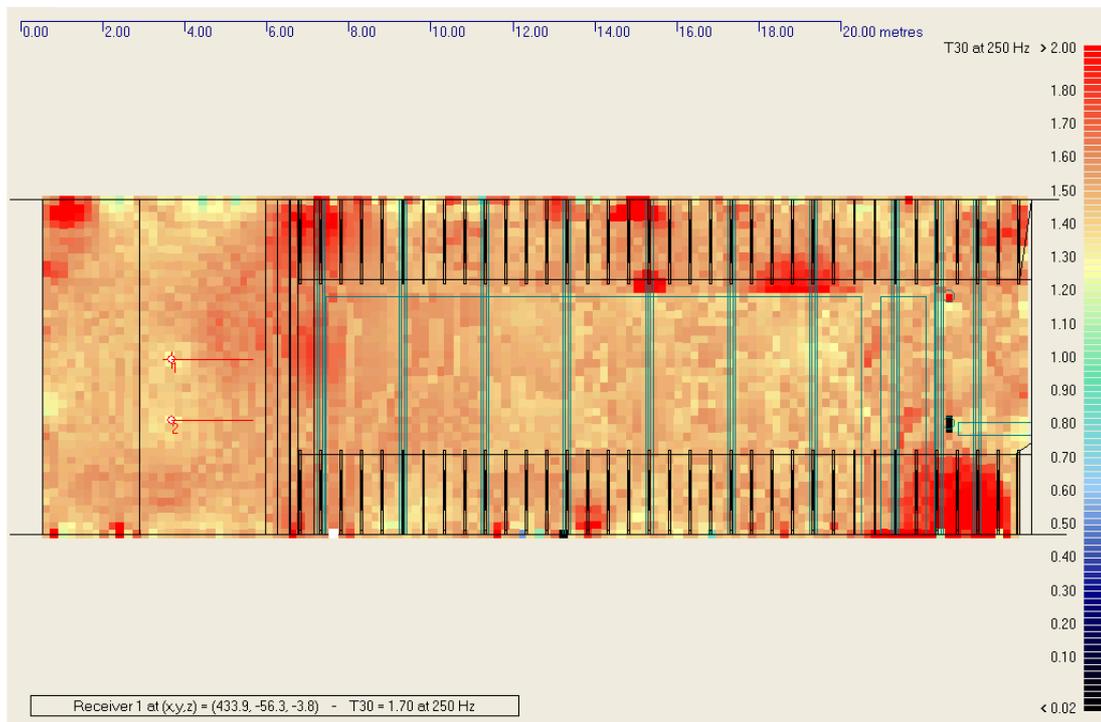


Figura 53.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz.

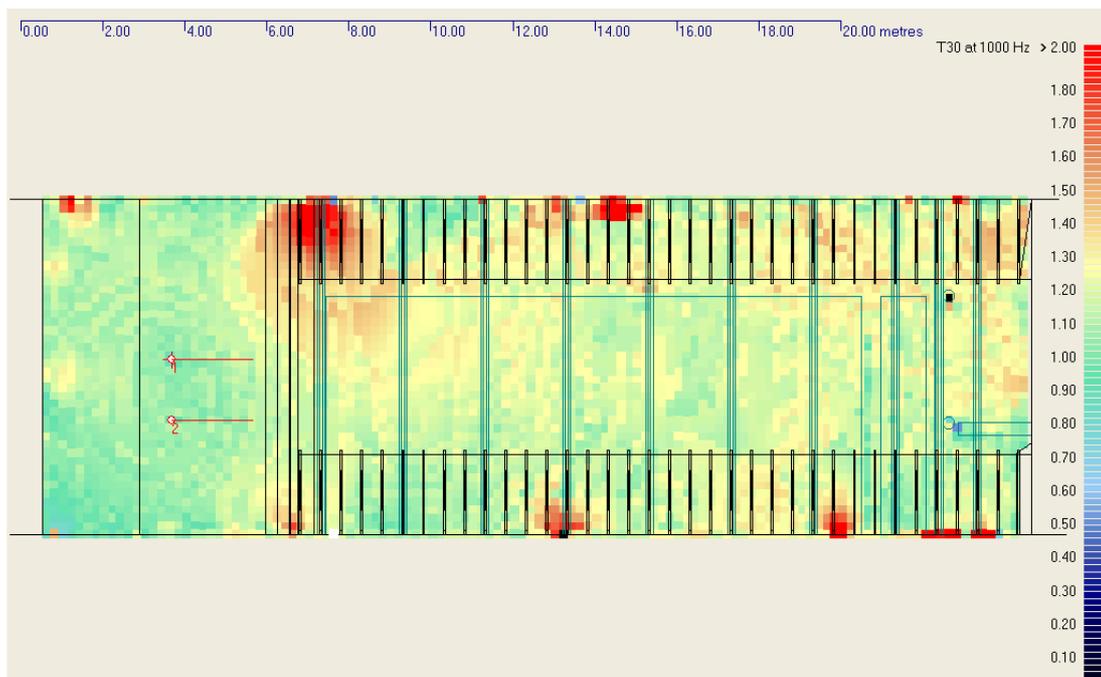


Figura 54.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 1.000 Hz.

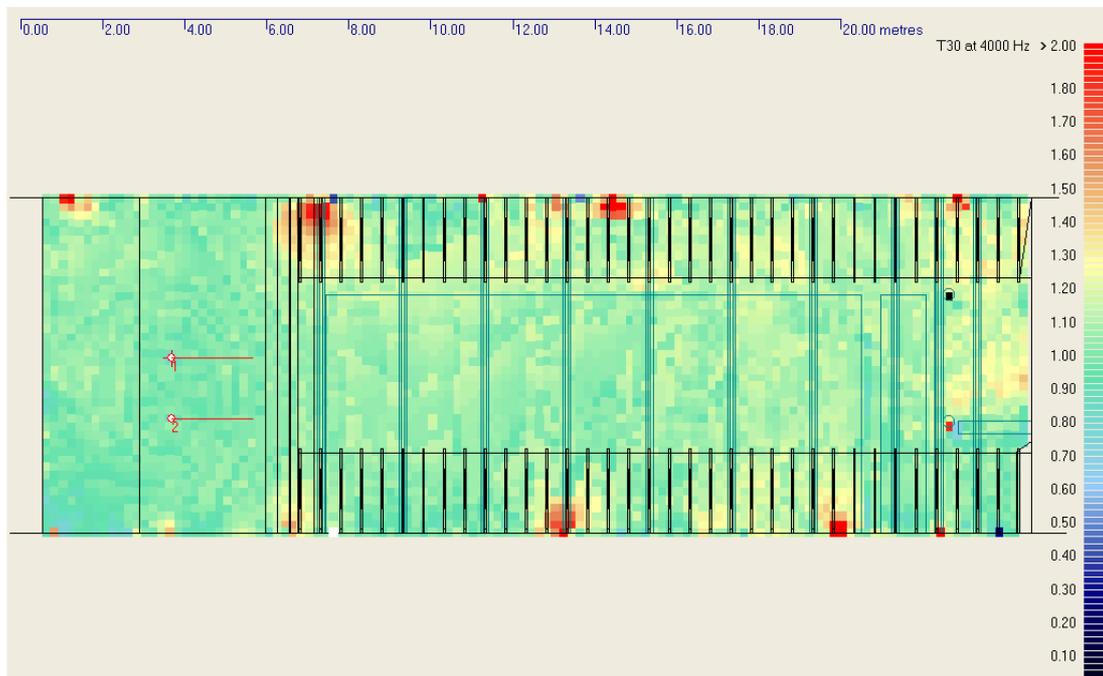


Figura 55.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz.

Se aprecian zonas puntuales con un tiempo de reverberación más alto que la media, pero es debido a que esas zonas puntuales son:

- 1- La zona de acceso. Esta zona se encuentra detrás del graderío, debajo del coro y tiene un pequeño mostrador. Los rayos una vez que llegan a este espacio tienen muchas más reflexiones que en el resto de la sala, con lo que el tiempo de reverberación es más alto. No representa ningún problema en cuanto a acústica de la sala puesto que es una zona donde no se encuentra público.
- 2- La zona de escalera frente al pasillo de acceso. Esta zona recibe las reflexiones del tornavoz y justo en la vertical se encuentra un plano vertical que se encuentra con la cubierta. Esta zona tampoco representa ningún problema por no tener público.

5.6.3.3 Nivel de presión sonora con ponderación A

La distribución de los niveles resulta homogénea, con variaciones mínimas entre unos puntos y otros.

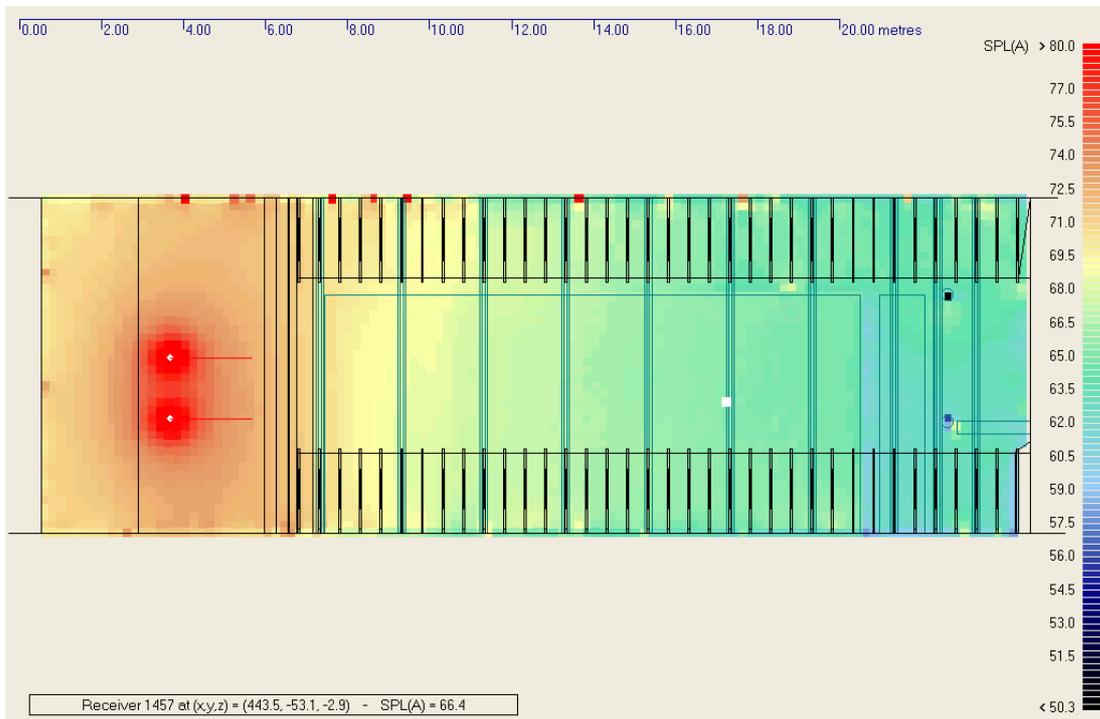


Figura 56.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio.

Al igual que en el estudio anterior (nave lateral derecha), se han tomado los resultados de tres puntos, con la condición de que el segundo doblara en distancia al primer, y el tercero doblara en distancia al segundo. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

$$L_{p1,A} (3,90 \text{ m}) = 71,7 \text{ dBA}$$

$$L_{p2,A} (7,80 \text{ m}) = 68,8 \text{ dBA}$$

$$L_{p3,A} (15,60 \text{ m}) = 66,4 \text{ dBA}$$

Las caídas de los niveles son de **2,9 dBA** y **2,4 dBA**, por lo que **se mejoran los 6 dBA** que se perderían en campo abierto al doblar la distancia a la fuente.

5.6.3.4 Claridad musical

Se incorpora el parámetro de claridad musical que, como se ha visto en el punto 2.2.5, da una idea del grado de separación entre los diferentes sonidos. Por lo tanto es un parámetro más que informará sobre las características acústicas de esta sala.

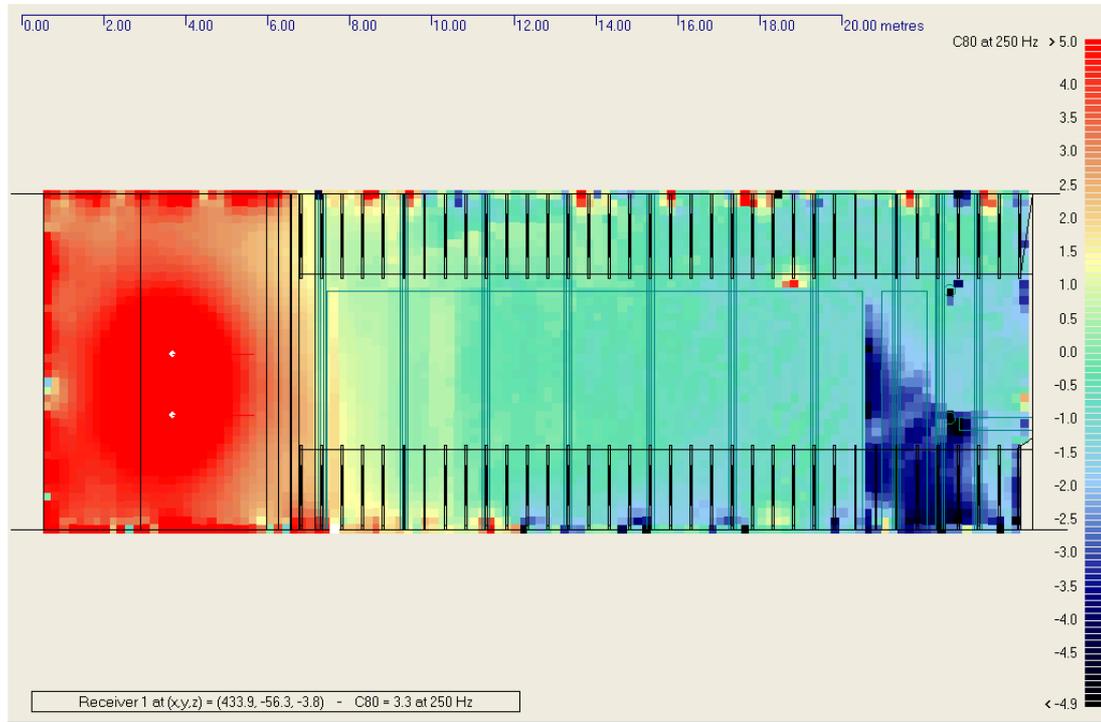


Figura 57.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz.

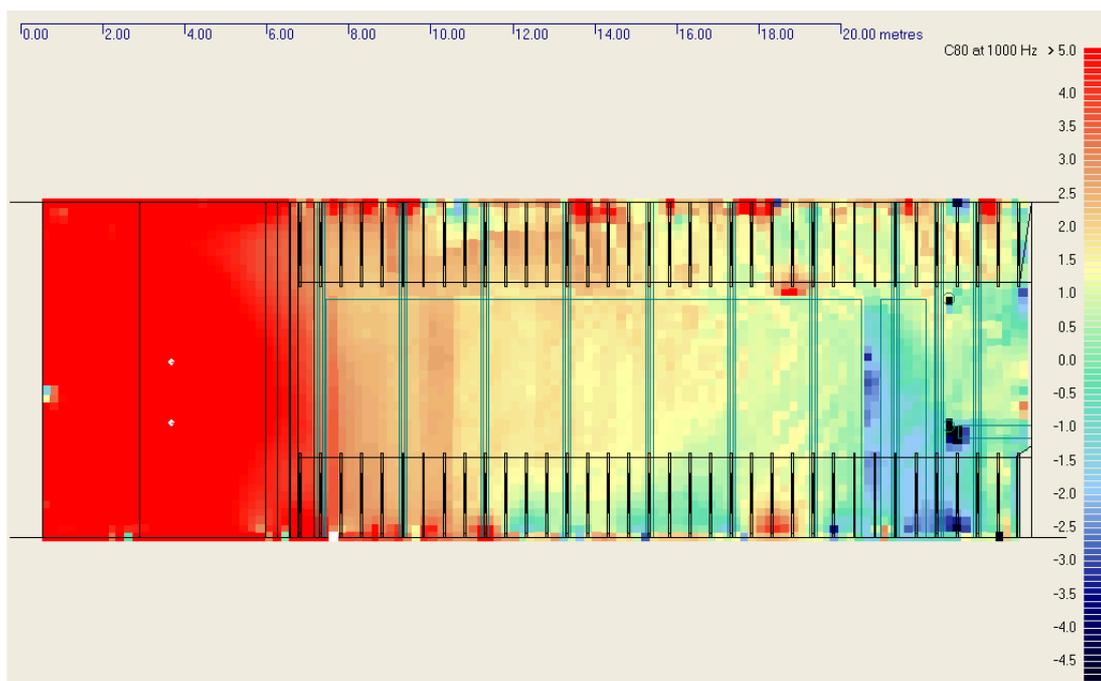


Figura 58.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 1.000 Hz.

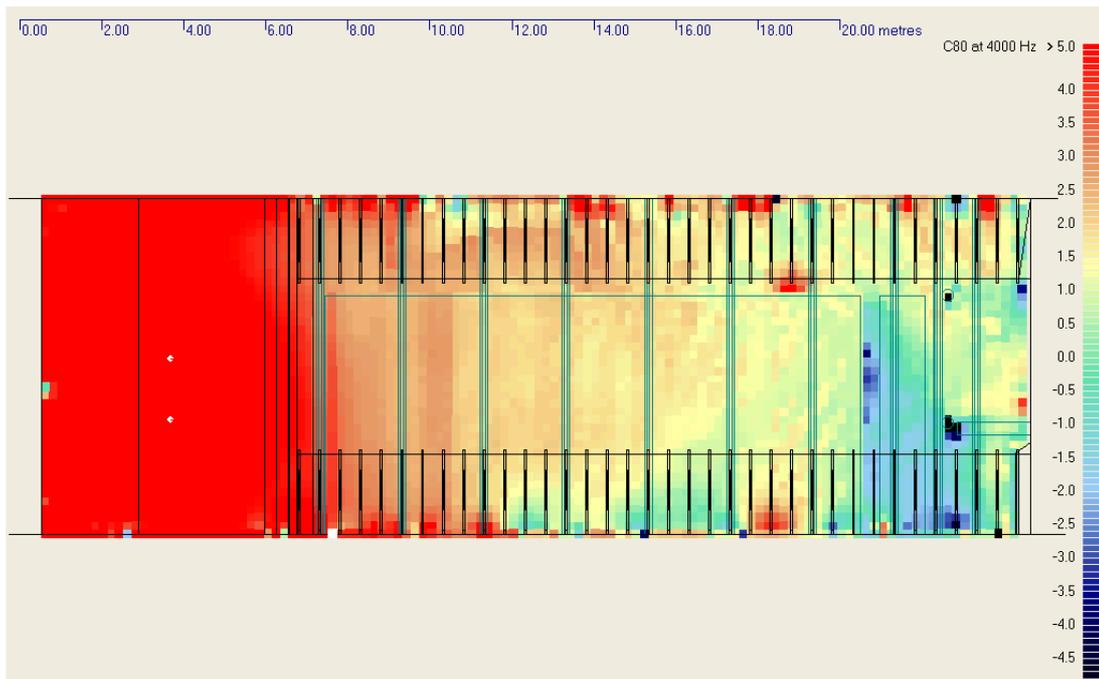


Figura 59.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz.

La claridad también está regularmente distribuida por la nave, con unos valores óptimos para el uso de la música. En este caso se encuentran entre -1,3 dB a 250 Hz y 2,5 dB.

5.6.3.5 Evaluación del estado final

Los resultados obtenidos en la simulación final son óptimos. Por un lado tenemos unos tiempos de reverberación adecuados al uso de la sala y por otro tenemos unos niveles de presión sonora muy homogéneos y con pocas pérdidas, esto permite que no sea necesario el uso de amplificadores de sonido para que llegue a las últimas filas. La claridad musical se ha mejorado notablemente y se ha conseguido situar en unos valores óptimos.

Parámetro \ Sala	Valores óptimos	Valores obtenidos	Cumplimiento
Tr (s)	1,3 – 1,7	1,3	Cumple
EDT (s)	1,3 – 1,7	1,3	Cumple
C ₈₀	-2 dB ≤ C ₈₀ ≤ +2 dB	-1,3dB ≤ C ₈₀ ≤ +2,5dB	Cumple

Tabla 8.- Resumen con la evaluación de los objetivos acústicos fijados para el auditorio. Elaboración propia.

Parámetro \ Sala	Valores óptimos	Valores finales	Valores iniciales
Tr (s)	1,3 – 1,7	1,3	3,5
EDT (s)	1,3 – 1,7	1,3	3,5
C ₈₀	-2 dB ≤ C ₈₀ ≤ +2 dB	-1,3dB ≤ C ₈₀ ≤ +2,5dB	-11dB ≤ C ₈₀ ≤ -2dB

Tabla 9.- Resumen con la comparativa de los resultados de la simulación inicial y la simulación final para el auditorio. Elaboración propia.

5.7 Valoración de las reformas

Sin ninguna normativa que nos fije unos límites claros a la hora de mejorar la acústica de una sala, tenemos unos valores óptimos que han sido propuestos por muchos investigadores y estudiosos del tema de la acústica. Estos valores óptimos nos sirven de guía de cara a realizar mejoras dentro de un espacio, o a la hora de realizar de cero un espacio con un buen acondicionamiento.

En el caso de la nave central se partía de un tiempo de reverberación muy alto y muy mala claridad musical. Gracias al uso de materiales acústicos (tanto reflectantes como absorbentes), de elementos que cambian la geometría de la sala (chaflanes y tornavoz) y de una reducción de su volumen, se ha conseguido establecer un valor de tiempo de reverberación, unos niveles de presión sonora con ponderación A y una claridad musical óptimos. Quizás alguno de ellos rozando los valores óptimos, pero dentro de los mismos. Por otro lado, se ha proyectado la instalación de un graderío, que permite una mejor visión y audición directa al estar en pendiente. Por lo tanto, la reforma proyectada cumple con los objetivos fijados al inicio del trabajo.

En el caso de los otros dos patios se partía de una premisa muy diferente a la nave central, en este caso no se tenía ningún condicionante previo. Desde un punto de vista arquitectónico se pensó en proyectar una ventana corrida apoyada en el muro existente que bañara de luz ambos espacios, y una cubierta ligera como medio de ahorro de costes. Sin condicionantes, ha resultado menos ardua la tarea de acondicionar estos espacios que la nave central.

Para el caso de la sala de conferencias se pensó en un techo parcialmente equipotencial que repartiera de una manera homogénea las reflexiones en la sala, y así se ha conseguido, teniendo unos niveles de presión sonora muy similares en todos los puntos de la sala. Combinando materiales reflectantes y absorbentes también se ha conseguido una mejora clara en los niveles de presión sonora y en la definición, por lo que se puede concluir diciendo, como en el caso anterior, que la reforma ha permitido crear unas condiciones acústicas adecuadas al uso de la sala y por lo tanto, cumplir con los objetivos fijados al inicio del estudio.

Para el caso de la sala de exposiciones se pensó en un espacio intimista, por lo que era necesario un tiempo de reverberación bajo. Por ello se proyecta un falso techo con paneles absorbentes y dentro de la zona de exposición, otros dos paneles verticales de las mismas características. Gracias a ello se alcanzan los objetivos fijados desde el principio.

Se ha conseguido acondicionar satisfactoriamente un espacio existente y dos espacios nuevos de acuerdo a unos usos prefijados, y por lo tanto, se han cumplido los objetivos fijados desde el inicio del proyecto.

6 COMPARACIÓN DE PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

6.1 Introducción y objetivos

Aunque se han dado algunas pinceladas a lo largo de esta memoria sobre los métodos de trabajo respecto a los dos programas, se hace necesario un análisis más exhaustivo si se quiere hacer una correcta valoración sobre ellos. Los programas de simulación acústica son el Odeon y el CATT Accoustic. El haber realizado las simulaciones con estos dos programas es debido a que:

- Odeon es el programa que se utiliza en la empresa donde he realizado la estancia formativa y por lo tanto podía disponer de él.
- CATT Accoustic es el programa del cual el departamento de física de la universidad de Valladolid dispone de licencia.

Estas dos causas han sido las que ha llevado a utilizarlos en el desarrollo del trabajo fin de máster. Hay más programas comerciales como pueden ser Ease o Cadna-R, pero no se ha podido trabajar con ellos. Los objetivos de esta parte del trabajo son claros, conocer y evaluar cada uno de los programas y realizar una comparativa que permita extraer las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. El procedimiento de análisis será similar a la forma de trabajar con ellos, teniendo las siguientes partes:

- 1- Análisis del interfaz, modelizado e introducción de los datos.
- 2- Estudio de los posibles parámetros que podemos obtener después de una simulación con cada uno de ellos.
- 3- Enumeración de otras características que poseen cada uno de los programas.
- 4- Coste de adquisición de los programas de simulación y sus respectivas actualizaciones.
- 5- Comparación de dos simulaciones de un mismo espacio bajo condiciones iniciales idénticas.
- 6- Conclusiones.

6.2 Modelizado, interfaz e introducción de datos

Estos aspectos han sido tratados para cada uno de los softwares en los puntos 5.1, 5.2 y 5.3.

El resumen de la evaluación comparativa entre ambos se describe a continuación. Ambos programas tienen puntos a favor y en contra. Son los siguientes:

- 1- El modelado del espacio a simular es más sencillo realizarlo para el CATT porque no es necesario que sus caras sean triángulos, si no que pueden ser planos de lados cualesquiera. **Mejor el CATT.**

- 2- Por otro lado, una vez realizado el modelo para el Odeon, no se hace necesario nada más. Lo contrario sucede con el CATT, que es necesario introducir las fuentes y receptores para dar el modelo por concluido. **Mejor el Odeon.**
- 3- Para transformar el modelo y que pueda ser reconocido por los programas, un simple *Guardar como... .dxf* es suficiente con el Odeon, mientras que con el CATT es necesario cargar una aplicación en AutoCAD. **Mejor el Odeon.**
- 4- La introducción de los datos es mucho más sencilla con el Odeon, puesto que se realiza una vez dentro del programa y es mucho más intuitivo que en el caso del CATT. **Mejor el Odeon.**
- 5- Uno de los principales problemas que nos encontramos a la hora de modelizar es cerrar bien el modelo para evitar errores en los resultados. En este caso, el CATT nos da directamente este dato una vez hayamos hecho una simulación y en %, mientras que en el Odeon hay que realizar una explosión de partículas y esperar a ver si se escapa por alguna abertura del modelo. **Mejor el CATT.**

Etapa del proceso de simulación	ODEON	CATT
MODELADO	++	+++
INTRODUCCIÓN DE FUENTES Y RECEPTORES	+++	++
TRANSFORMACIÓN DEL MODELO	++++	++
INTRODUCCIÓN DE DATOS	+++	++
COMPROBACIÓN DEL MODELO	++	++++

Tabla 10.- Comparativa de modelizado, interfaz e introducción de datos de cada uno de los programas de simulación. Elaboración propia.

En la tabla 10 se puede contrastar la valoración personal de ambos programas, con el siguiente criterio:

- + Mejorable
- ++ Correcto
- +++ Bueno
- ++++ Excelente

6.3 Parámetros acústicos y tiempos de simulación

Los parámetros acústicos que se pueden obtener con ambos programa son los siguientes:

PARÁMETRO	ODEON	CATT
EDT	X	X
T30	X	X
Ts	X	X
SPL	X	X
D50	X	X
C50	-	X
C80	X	X
LF80	X	X
SPL(A)	X	X
STI	X	X
Lj	X	X

Tabla 11.- Resumen con los parámetros proporcionados por cada uno de los programas de simulación. Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla 11, ambos softwares proporcionan los mismos parámetros al realizar las simulaciones, por lo tanto en este caso tenemos empate, no hay uno mejor ni uno peor.

En cuanto a los tiempos de simulación, no se puede realizar una valoración objetiva debido a que los programas han sido utilizados en ordenadores diferentes, con diferentes características técnicas. Por ello es imposible comparar los tiempos en realizar una misma simulación, con el mismo mallado y parámetros.

6.4 Otras características

Con estos dos programas de simulación, aparte de obtener los parámetros descritos en el apartado anterior, podemos obtener más información sobre las características acústicas del espacio que estamos estudiando.

INFORMACIÓN	ODEON	CATT
AURALIZACIÓN	X	X
ECOGRAMAS	-	X
DISTRIBUCIÓN DEL SONIDO	-	X
ESPECTROGRAMA	-	X
TRAZADO DE RAYOS	X	X

Tabla 12.- Resumen con la información suplementaria proporcionada por cada uno de los programas de simulación. Elaboración propia.

Como resumen, se puede concluir diciendo que el CATT aporta una mayor información y posibilidades a mayores que el Odeon. Por lo tanto, en este aspecto es mucho mejor el CATT.

6.5 Coste económico de adquisición

Un factor casi determinante a la hora de hacer una valoración entre ambos programas es el esfuerzo económico a realizar para su adquisición. Los precios (2015) son los siguientes:

Odeon combined [19]

VERSIÓN	LICENCIA PROFESIONAL	LICENCIA ACADÉMICA
BÁSICA	16.135 euros	8.067 euros
ASISTENCIA TÉCNICA (1 AÑO)	1.854 euros	926 euros
ACTUALIZACIÓN PARA V5.0 Y POSTERIOR	4.034 euros	2.016 euros

Tabla 13.- Resumen con la información sobre los costes de adquisición de programa Odeon. Elaboración propia.

CATT [20]

VERSIÓN	LICENCIA PROFESIONAL	LICENCIA ACADÉMICA
BÁSICA	2.400 euros	1.560 euros
ASISTENCIA TÉCNICA (1 AÑO) Y ACTUALIZACIÓN	1.180 euros	766 euros

Tabla 14.- Tabla-resumen con la información sobre los costes de adquisición de programa CATT.
Elaboración propia.

6.6 Comparación de ambos softwares mediante un caso de estudio

Para analizar las diferencias entre los resultados obtenidos con cada uno de los programas, se utilizará la simulación del auditorio, con el mismo procedimiento que en el punto 5.4 (página 42), pero únicamente para las frecuencias de 250 Hz y 4.000 Hz. Los resultados para el resto de frecuencias se exponen en el ANEXO I.

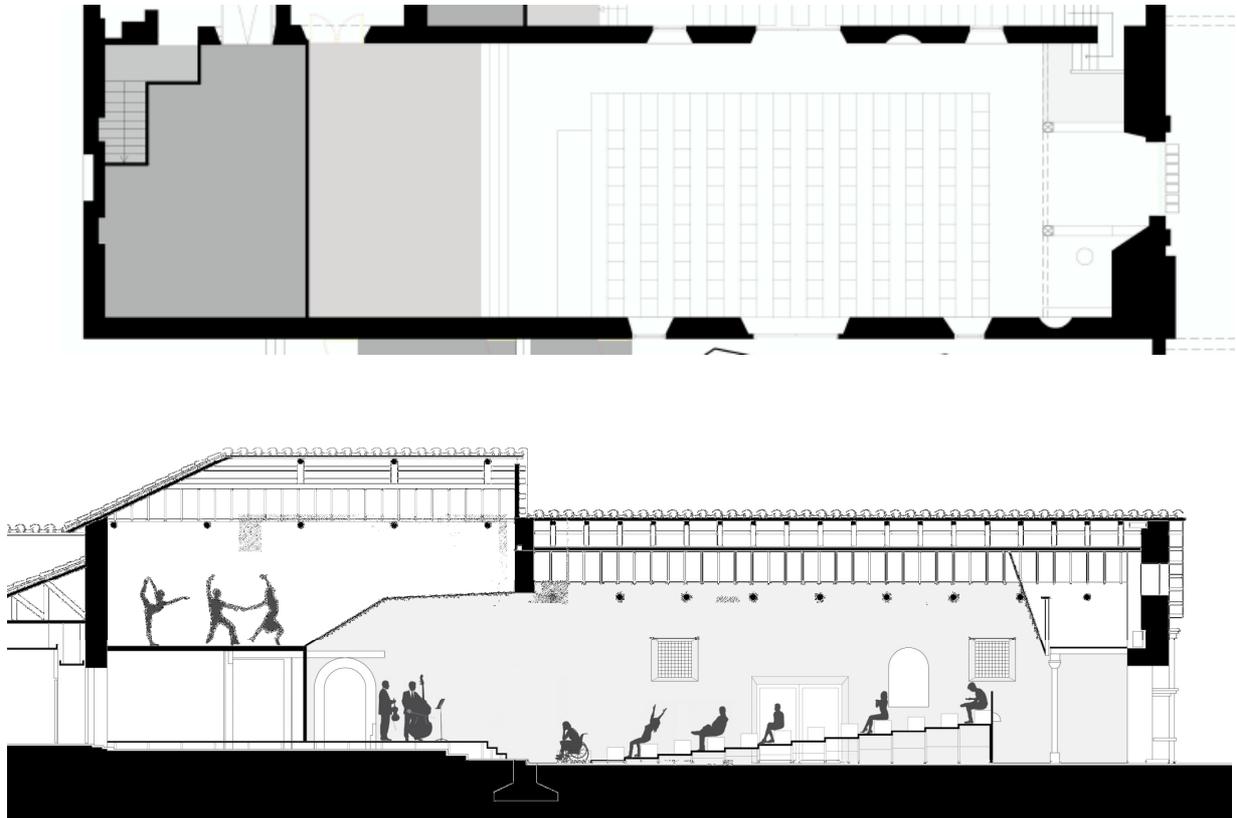


Figura 60.- Planta y sección de auditorio. Elaboración propia.

6.6.1 Tiempos de reverberación

Para los cálculos del tiempo de reverberación se ha tomado los cálculos realizados por el método de trazado de rayos.

Como se observa en la tabla 15, los tiempos de reverberación que se obtienen con los dos programas son prácticamente los mismos, las mayores variaciones están en torno a 0,1 segundos. Las diferencias, por tanto, son mínimas y entran dentro de unos límites aceptables, por lo que se puede decir que ambos programas ofrecen los mismos valores de T30.

Frecuencia (Hz)	T30 CATT (s)	T30 Odeon (s)	Diferencia (s)	Diferencia (%)
125	1,94	1,84	0,10	5,1
250	1,63	1,53	0,10	6,1
500	1,52	1,39	0,13	8,6
1.000	1,29	1,21	0,08	6,2
2.000	1,44	1,40	0,04	2,8
4.000	1,21	1,12	0,09	7,4
8.000	0,77	0,70	0,07	9,1

Tabla 15.- Diferencias en el T30 en bandas de octava en el auditorio entre CATT y Odeon. Elaboración propia.

6.6.2 Tiempos de reverberación en la nave

Se comienza la presentación de los resultados por el tiempo de reverberación puesto que es uno de los parámetros más importantes para valorar el acondicionamiento acústico de una sala.

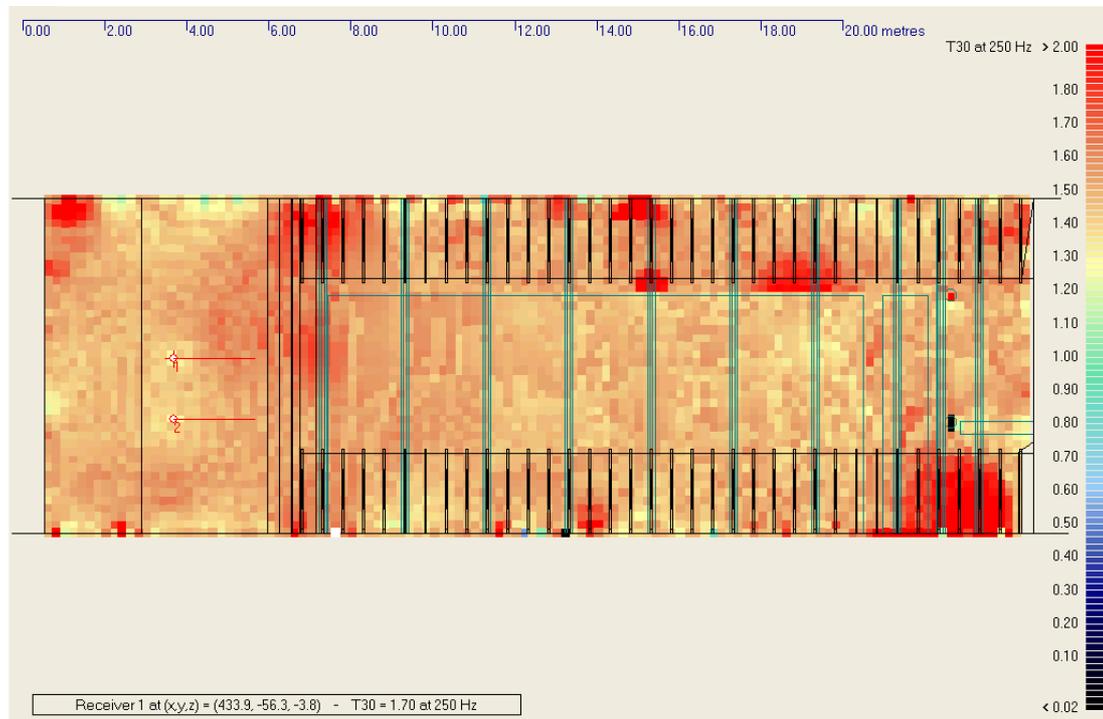


Figura 61.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (T_{r30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con Odeon.

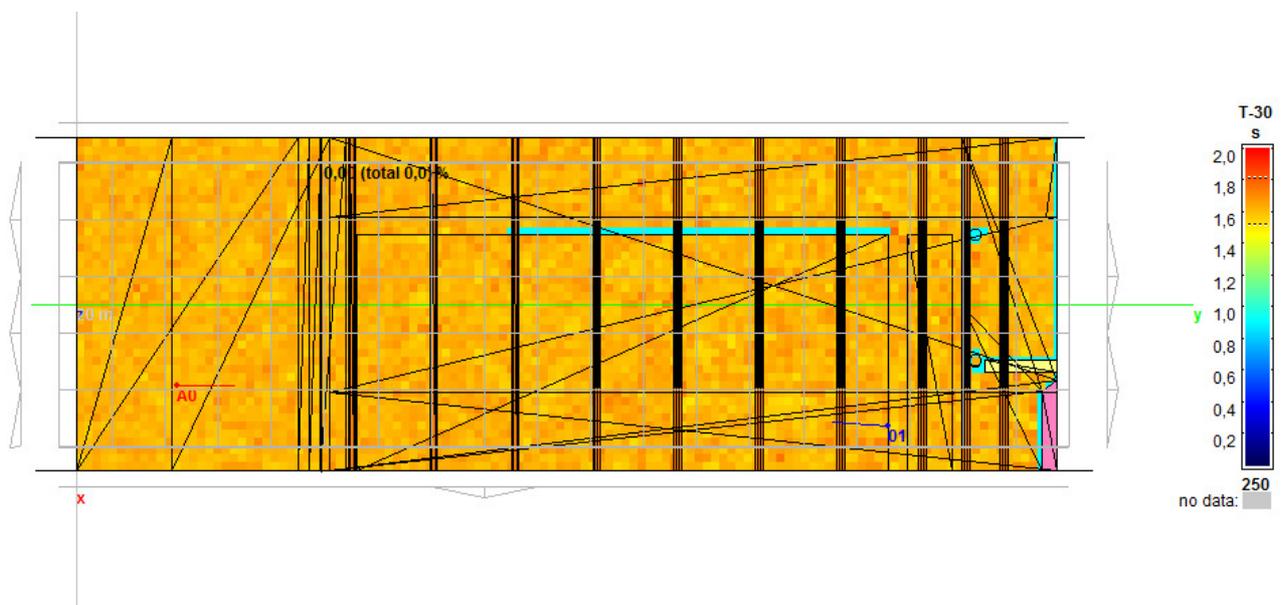


Figura 62.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (T_{r30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con CATT.

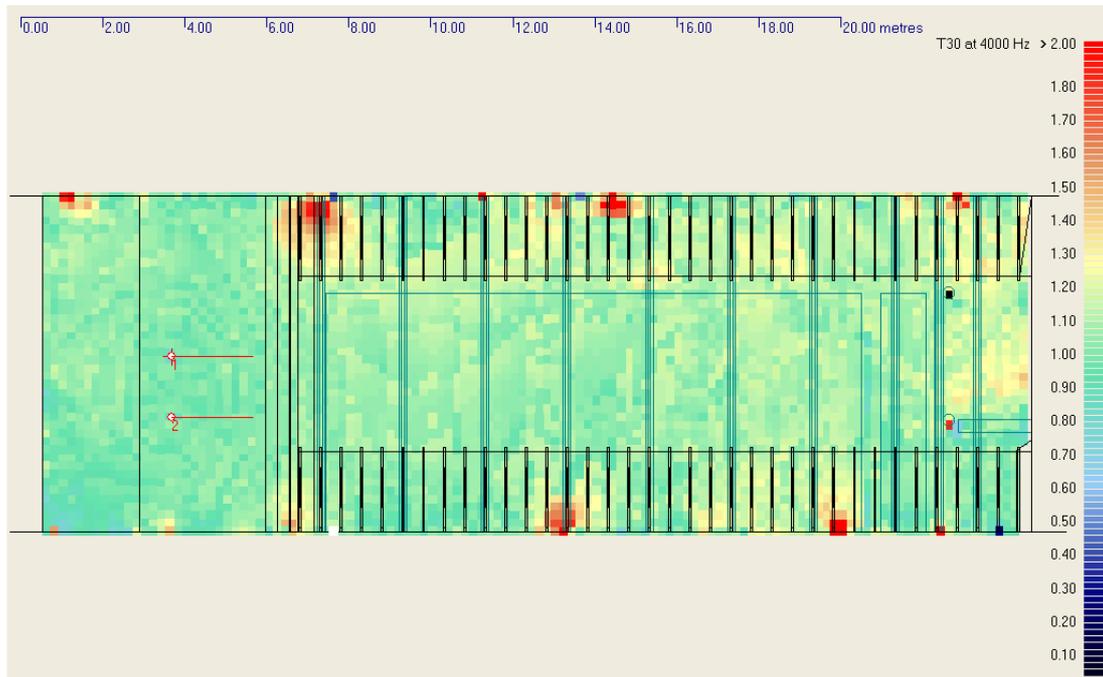


Figura 63.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.

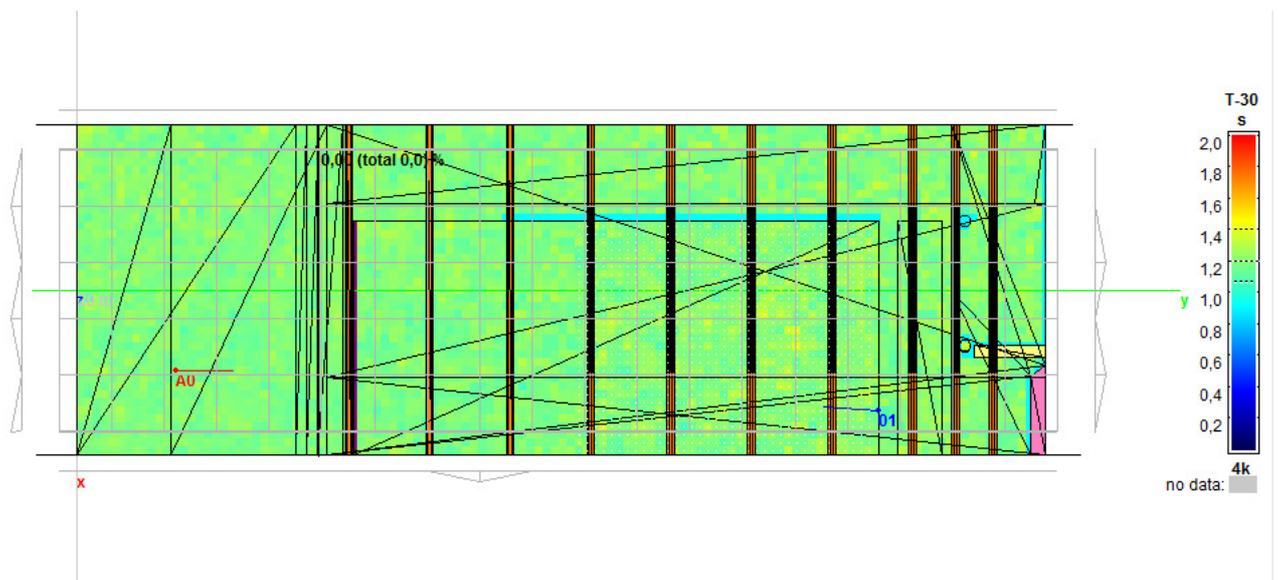


Figura 64.- Valores del tiempo de reverberación para una caída de 30 dB (Tr_{30}) en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con CATT.

En el análisis de los resultados del T_{30} que nos proporcionan ambos programas, se puede destacar lo siguiente:

- 1- En ambos casos aparece una distribución del T_{30} , en su mayoría, homogénea a todas las frecuencias.
- 2- En el caso del Odeon, se ven dos zonas diferenciadas, una en la zona de acceso (en el rango de 250 Hz a 2.000 Hz) y otra en la prolongación del pasillo de acceso a la grada, en la zona de la escalera (en todo el rango de frecuencias). Estas dos anomalías en el T_{30} no son simuladas por el CATT y no se ha conseguido dar una explicación a esto.

6.6.3 Nivel de presión sonora con ponderación A (decibelios A)

Comparando la distribución del SPL(A) en la sala de acuerdo a ambos softwares, se observa que los resultados son los mismos, con una caída en los niveles cuanto más lejos de la fuente y sin ninguna anomalía. El sonido no solo es sonido directo y las reflexiones se tienen en cuenta hasta un tiempo de 1,5 segundos e ambos casos.

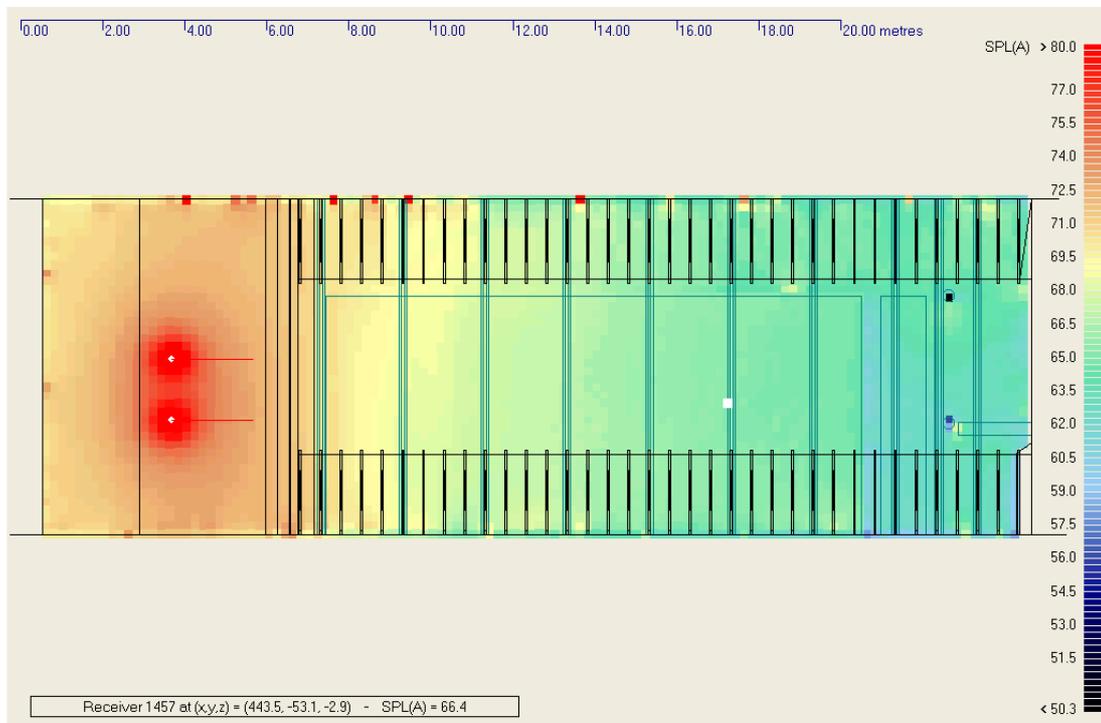


Figura 65.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio con Odeon.

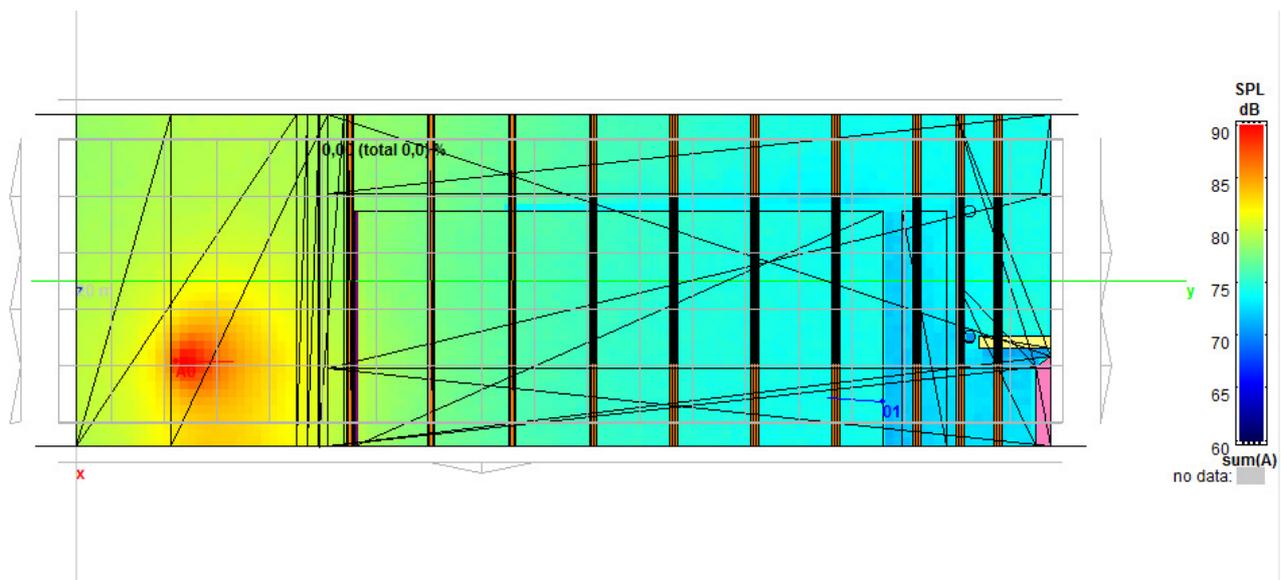


Figura 66.- Valores del nivel de presión sonora con ponderación A en diferentes puntos del auditorio con CATT.

6.6.4 Claridad musical

Como se apunta en el punto 5.6.3.3, la claridad musical da una idea del grado de separación entre los diferentes sonidos, calculando que energía sonora llega al oyente durante los primeros 80 ms respecto del total. Por lo tanto es un parámetro más que informará sobre las características acústicas de esta sala.

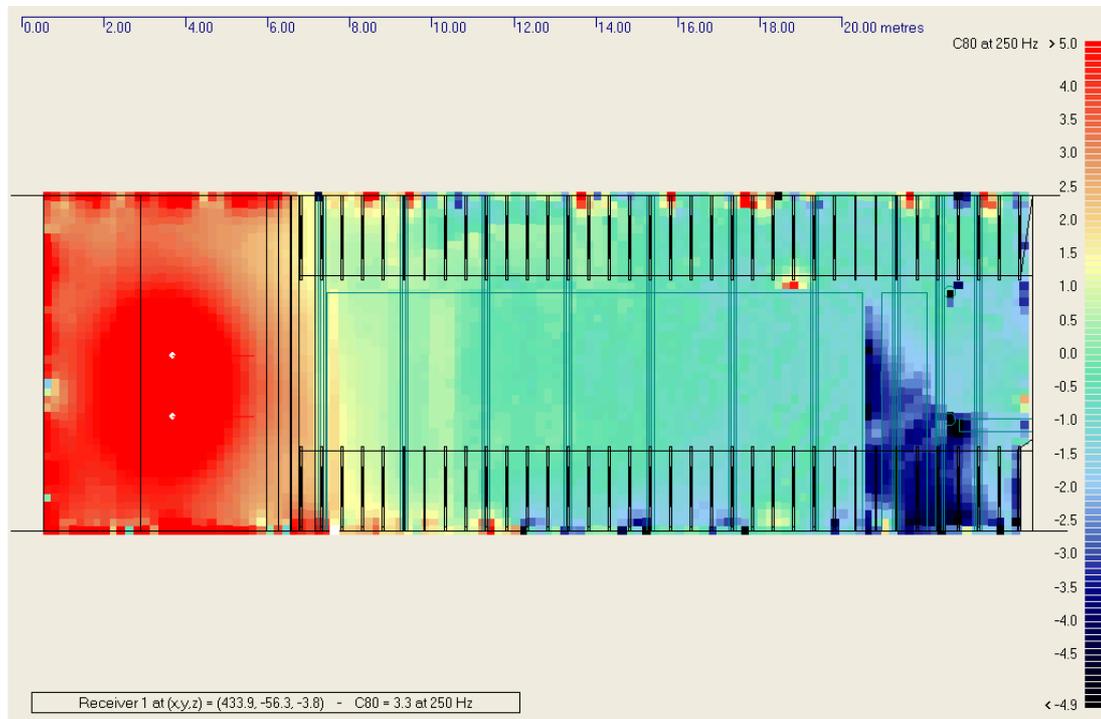


Figura 67.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con Odeon.

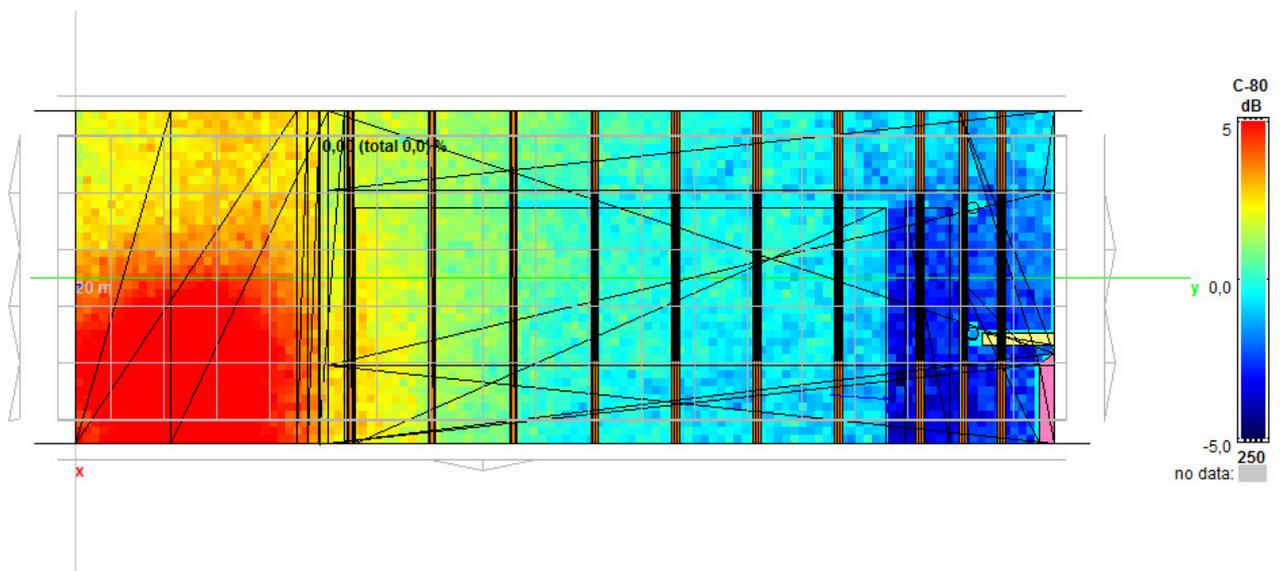


Figura 68.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 250 Hz con CATT.

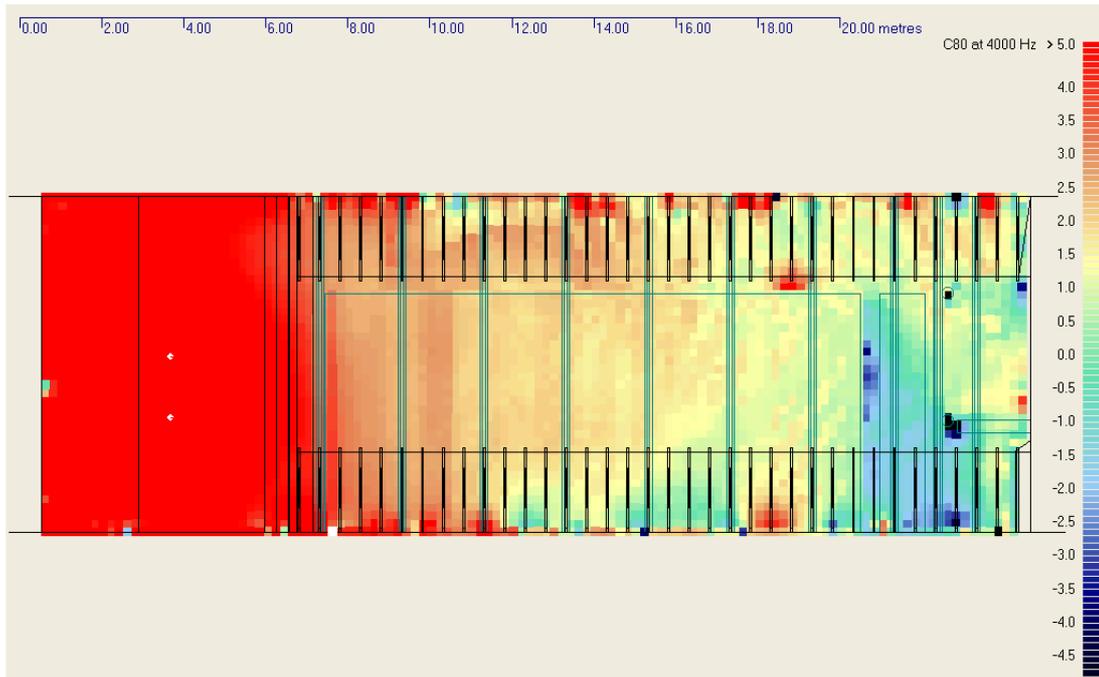


Figura 69.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.

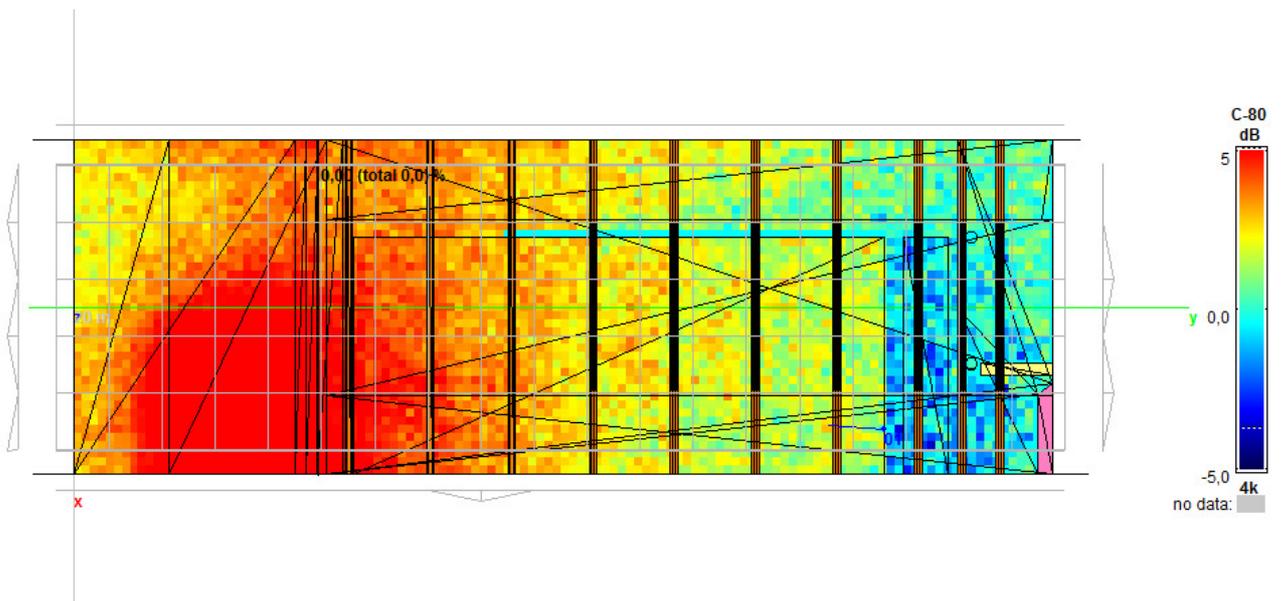


Figura 70.- Valores de la claridad en diferentes puntos del auditorio para una frecuencia de 4.000 Hz con Odeon.

En el caso de la claridad musical también se aprecia una coincidencia en los resultados. La zona delantera de la grada tiene los valores más altos y la trasera los más bajos, aparece una zona donde cae mucho la claridad, que es la zona del acceso en ambos casos y se ve un aumento global de los valores a medida que la frecuencia es mayor.

6.7 Conclusiones

Una vez realizado un estudio comparativo de ambos programas, podemos extraer una serie de conclusiones:

- Ambos programas se encuentran englobados dentro del grupo dedicado a las simulaciones en el ámbito de la acústica. Son softwares que se pueden adquirir a través de los distribuidores dentro del país o fabricantes del propio programa.
- Antes de comenzar a trabajar con estos programas, debe crearse un modelo 3D del espacio a simular. Este proceso tiene sus pros y contras en ambos casos, mientras que en el caso del Odeon hay que triangular todas las superficies, introducir los materiales, fuentes y receptores es mucho más sencillo que en el caso del CATT porque se realiza en el propio interfaz del programa. El CATT la ventaja que nos aporta frente al Odeon es que no es necesario triangular, los planos pueden tener caras sin límite de vértices, pero los materiales, fuentes y receptores tienen que ser introducidos a través de AutoCAD.
- Los parámetros básicos que nos aportan ambos programas son muy similares, mientras que el CATT tiene mayores posibilidades frente al Odeon de aportar información adicional, como pueden ser ecogramas o espectrogramas. Ambos programas pueden realizar auralizaciones. En este caso el CATT es un programa más potente.
- El esfuerzo económico necesario para la adquisición de ambos programas es alto, pero destaca por encima el Odeon. Su precio de adquisición es unas 7 veces mayor que el del CATT. Pero esto ocurre en la mayoría de los productos de la marca Brüel&Kjær frente a la competencia.
- Las simulaciones realizadas nos aportan valores muy similares de los parámetros básicos. En el caso del T_{30} nos encontramos con unas diferencias en torno al 5-10%. El resto de parámetros arrojan valores también muy próximos, apareciendo en el ejemplo mostrado algunas diferencias en el caso del tiempo de reverberación, donde el CATT no simula algunas anomalías que si se presentan en el Odeon.

Si hubiese que hacer una valoración global, se podría decir que el Odeon es un programa mucho más intuitivo de cara al modelado y uso, con un interfaz mucho más sencillo de manejar, pero a cambio de un coste de adquisición muy alto. Por el contrario, el CATT es un software mucho más económico, con más posibilidades en cuanto a prestaciones e información que nos puede aportar, pero con un modelado e interfaz más complicado que en el caso del programa Odeon.

7 COSTE DE LA REFORMA

Con el fin de dar un carácter más realista al trabajo fin de máster se incluye un presupuesto del coste de la reforma de la iglesia. En él se incluyen todas las partidas que lo conforman y un resumen final. Se ha optado por la elección de una distribuidora local de materiales, pero los precios se han obtenido de la base de datos de Extremadura. El presupuesto se ha desarrollado con la hoja de cálculo Excel, con una programación realizada personalmente. Se incluye una descripción de las partidas donde se indica pormenorizadamente las acciones a llevar a cabo.

En el resumen se incluye un listado de los capítulos con el % de repercusión sobre el presupuesto de ejecución material. Por último, se especifica el presupuesto por contrata y el presupuesto general.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 01 Demolición									
01.01	m2 DEMOLICIÓN DE MURO DE LADRILLO HUECO								
	Demolición de muro de fábrica de ladrillo hueco con medios manuales, colocación y retirada de andamio y carga manual de escombros a camión o contenedor.								
	<i>Arco total</i>	1				29,34			
							29,34	66,20	1.942,31
TOTAL CAPITULO 01 Demolición									1.942,31
CAPÍTULO 02 Cerramientos interiores									
02.01	m2 TABIQUE SENCILLO (13+70+13) E=96mm./400								
	Tabique sencillo autoportante formado por montantes separados 400 mm. y canales de perfiles de chapa de acero galvanizado de 70 mm., atornillado por cada cara una placa de 13 mm. de espesor con un ancho total de 96 mm., sin aislamiento. l/p.p. de tratamiento de huecos, paso de instalaciones, tornillería, pastas de agarre y juntas, cintas para juntas, anclajes para suelo y techo, limpieza y medios auxiliares. Totalmente terminado y listo para imprimir y pintar o decorar. Según UNE 102040 IN y ATEDY. Medido deduciendo los huecos de superficie mayor de 2 m2.								
	<i>Almacen sala lat derecha</i>	1	6,60		5,40	35,64			
	<i>Almacen sala lat izquierda</i>	1	5,00		5,00	25,00			
	<i>Almacen sala central</i>	1	8,25		2,90	23,93			
	<i>Puertas de acceso</i>	-3				2,10			
							78,27	51,21	4.007,95
TOTAL CAPITULO 02 Cerramientos interiores									4.007,95
CAPÍTULO 03 Carpintería exterior									
03.01	m2 CARP. EXT. PINO PAÍS LACADA								
	Carpintería exterior para ventanas y/o balcones de hojas practicables, en madera de pino del país 1ª sin nudos lacada, con cerco sin carriles para persiana y con hojas sin partelunas, incluso precerco de pino 70x35 mm., tapajuntas interiores lisos de pino macizo lacados 70x10 mm., totalmente montada y con p.p. de medios auxiliares.								
	<i>Sala lat derecha</i>	2	27,50		0,05	2,75			
	<i>Sala lat izquierda</i>	2	23,00		0,05	2,30			
							5,05	123,56	623,98
TOTAL CAPITULO 03 Carpintería exterior									623,98

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
--------	---------	-----	----------	---------	--------	-----------	----------	--------	---------

CAPÍTULO 04 Albañilería

04.01 m2 F. TECHO CARTÓN YESO LISO 13 mm

Falso techo de cartón yeso formado por una placa de yeso de 13 mm. de espesor, colocada sobre una estructura oculta de acero galvanizado, formada por perfiles T/C de 40 mm. cada 40 cm. y perfilera U de 34x31x34 mm., i/replanteo auxiliar, accesorios de fijación, nivelación y repaso de juntas con cinta y pasta, montaje y desmontaje de andamios, totalmente terminado, medido deduciendo huecos superiores a 2 m2.

<i>Sala lat derecha</i>	1	8,00	6,60	52,80			
<i>Sala central</i>	1	10,50	8,25	86,63			
					139,43	21,21	2.957,20

04.02 m2 F. TECH. ACÚST. ABSORBENTE CAR. YES.

Falso techo formado por placas de yeso con perforación rectilínea (18,1%) de espesor 12,5 mm., atornilladas sobre estructura metálica de maestras 60/27/0,6 mm. con una separación máxima entre ejes de 320 mm. suspendidas del forjado o techo soporte, i/p.p. de elementos de remate, accesorios de fijación y montaje y desmontaje de andamios, totalmente terminado y listo para pintar, medido deduciendo huecos superiores a 2 m2.

<i>Sala lat derecha</i>	1	15,00	6,60	99,00			
<i>Sala lat izquierda</i>	1	15,20	5,00	76,00			
					175,00	62,21	10.886,75

04.03 m2 ESTRADO CARTÓN YESO LISO 13 mm

Estrado de cartón yeso formado por una placa de yeso de 13 mm. de espesor, colocada sobre una estructura oculta de acero galvanizado, formada por perfiles T/C de 40 mm. cada 40 cm. y perfilera U de 34x31x34 mm., i/replanteo auxiliar, accesorios de fijación, nivelación y repaso de juntas con cinta y pasta, montaje y desmontaje de andamios, totalmente terminado, medido deduciendo huecos superiores a 2 m2.

<i>Sala lat derecha</i>	1	6,60	3,00	19,80			
<i>Sala central</i>	1	8,25	6,00	49,50			
					69,30	34,45	2.387,39

TOTAL CAPITULO 04 Albañilería

16.231,34

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
--------	---------	-----	----------	---------	--------	-----------	----------	--------	---------

CAPÍTULO 05 Cubierta

05.01 m2 CUB.PL.NO TRANS.PROT PESADA.CANTO ROD.INV.PVC

Formación de pendientes con hormigón celular de espesor medio de 5 cm ofreciendo una terminación superior con mortero de regularización, capa separadora constituida por geotextil no tejido a base de polipropileno 100%, con solapes de 10 cm como mínimo, membrana impermeabilizante formado por lámina de PVC de 1,2 mm de espesor, armada con velo de fibra de vidrio, resistente a intemperie con solapes entre láminas de 5 cm, capa separadora de protección formada por geotextil de fibra de poliéster con solapes de 10 cm como mínimo, colocación de aislamiento térmico de poliestireno extruido de resistencia de compresión de 3kg/cm2 y de espesor 50 mm, capa separadora de geotextil termosoldado a base de polipropileno 100%. Acabado con canto rodado.

<i>Sala lat derecha</i>	1	21,00	6,60	138,60				
<i>Sala lat izquierda</i>	1	18,50	5,00	92,50				
					231,10	43,27	9.999,70	

TOTAL CAPITULO 05 Cubierta

9.999,70

CAPÍTULO 06 Estructura

06.01 m2 FORJADO CHAPA COLABORANTE 1,0 mm/ GAL.

Forjado de losa mixta, canto 10 cm, con chapa colaborante de acero galvanizado de 1,0 mm de espesor, de 200/210 mm de paso de malla y 60 mm de altura máxima; HA-25/P/12/IIa fabricado en central y vertido con cubilote; volumen total de hormigón 0,062 m³/m²; acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía total de 1 kg/m²; mallazo ME 15x30, Ø 6 mm, acero B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080. Incluso p/p de remates perimetrales y de voladizos, realizados a base de piezas angulares de chapa de acero galvanizado; formación de huecos y refuerzos adicionales; fijaciones de las chapas y remates, y apuntalamiento en las zonas donde sea necesario según datos del fabricante. Según normas EHE-08 y DB-SE-A.

<i>Sala lat derecha</i>	1	21,00	6,60	138,60				
<i>Sala lat izquierda</i>	1	18,50	5,00	92,50				
					231,10	96,71	22.349,68	

TOTAL CAPITULO 06 Estructura

22.349,68

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 07 Acabados									
07.01	m2 PINTU. TEMPLE LISO BLAN.S/ENFOSC Pintura al temple liso blanco dos manos, sobre paramentos verticales y horizontales, previa limpieza de salitres y polvo.								
	<i>Sala lat derecha (techo)</i>					52,80			
	<i>Sala lat izquierda (techo)</i>					76,00			
	<i>Sala central (techo)</i>					86,63			
	<i>Sala lat derecha (estrado)</i>					19,80			
	<i>Sala central (estrado)</i>					49,50			
							284,73	2,02	575,15
TOTAL CAPITULO 07 Acabados									575,15
CAPÍTULO 08 Carpintería interior									
08.01	ud. P. PASO LISA DE ROBLE Puerta de paso ciega normalizada, lisa, de roble barnizada, de dimensiones 825x2030 mm., incluso precerco de pino de 70x30 mm., galce o cerco visto de DM rechapado de roble de 70x30 mm., tapajuntas lisos de DM rechapado de roble 70x10 mm. en ambas caras, y herrajes de colgar y de cierre latonados, montada, incluso p.p. de medios auxiliares.								
	<i>Puerta</i>	3				3,00			
							3,00	184,42	553,26
TOTAL CAPITULO 08 Carpintería interior									553,26
CAPÍTULO 09 Vidriería									
09.01	m2 VIDRIO IMPRESO INCOLORO 9/11 mm Acristalamiento con vidrio translúcido e incoloro impreso de 9/11 mm. de espesor, fijación sobre carpintería con acuñado mediante calzos de apoyo perimetrales y laterales y sellado en frío con silicona incolora, incluso cortes de vidrio y colocación de junquillos, según NTE-FVP.								
	<i>Sala lat derecha</i>	1	27,50		1,20	33,00			
	<i>Sala lat izquierda</i>	1	23,00		1,20	27,60			
							60,60	53,26	3.227,56
TOTAL CAPITULO 09 Vidriería									3.227,56

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 10 Electricidad e iluminación									
10.01	ud. LUMINARIA INCANDESCENTE Luminaria incandescente en color blanco metalizado de alta gama para 1 lámpara de 100w. Vidrio de protección y equipo electrónico incorporado. La iluminaria se podrá montar sobre cualquier superficie mediante placa base incorpora o con adaptador sobre carril electrificado. Índice de protección IP20/Clasel . Instalado, incluyendo replanteo, accesorios de anclaje, conexionado y funcionando.	60,00				60,00			
							60,00	50,09	3.005,40
TOTAL CAPITULO 10 Electricidad e iluminación									3.005,40
CAPÍTULO 11 Plan de seguridad									
11.01	ud. PLAN DE SEGURIDAD PARA OBRA Plan de seguridad para una obra de rehabilitación en la ciudad de Cali, incluyendo mano de obra, materiales y todos los elementos auxiliares para garantizar la seguridad de todos los operarios y técnicos de la obra, incluyendo la elaboración del correspondiente Plan de Seguridad. <i>Plan de seguridad</i>	1				1,00			
							1,00	663,69	663,69
TOTAL CAPITULO 11 Plan de seguridad									663,69
TOTAL									63.180,01

CAPÍTULO	RESUMEN	EUROS	%
C01	Demolición	1.942,31	3,07
C02	Cerramientos interiores.....	4.007,95	6,34
C03	Carpintería exterior	623,98	0,99
C04	Albañilería	16.231,34	25,69
C05	Cubierta	9.999,70	15,83
C06	Estructura.....	22.349,68	35,37
C07	Acabados	575,15	0,91
C08	Carpintería interior.....	553,26	0,88
C09	Vidriería	3.227,56	5,11
C10	Electricidad e iluminación	3.005,40	4,76
C11	Plan de seguridad	663,69	1,05
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL		63.180,02	
	13% gastos generales	8.213,40	
	6% beneficio industrial	3.790,80	
	SUMA DE G.G. Y B.I.	12.004,20	
	21% I.V.A.	15.788,69	
TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA		90.972,91	
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		90.972,91	

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de
Valladolid , a 7 de julio de 2015.

El promotor

La dirección facultativa

8 CONCLUSIONES

Como se ha comentado en el primer capítulo del trabajo, los objetivos del trabajo aquí presentado eran los siguientes:

- Evaluar las condiciones acústicas de la nave central en su estado original.
- Hacer un diseño arquitectónico y acústico óptimo, encaminado a mejorar el acondicionamiento acústico de la nave central para su uso como auditorio.
- Crear y diseñar un espacio cuyo uso preferente sea el uso de la palabra (sala de conferencias) partiendo originalmente de un patio descubierto.
- Proyectar, con las condiciones arquitectónicas y acústicas adecuadas, un espacio cuyo uso principal sea el expositivo, creando una sala con carácter intimista.
- Poder valorar y comparar dos programas de simulación acústica.
- Adquirir habilidad en el manejo de los dos programas.

Consecución de los objetivos:

Se ha caracterizado acústicamente la nave central en su estado original, conociendo los valores de los parámetros acústicos necesarios para su cambio de uso a auditorio. Se ha visto como ninguno de ellos estaba dentro de los valores óptimos para su uso como espacio donde escuchar música. Los otros dos espacios eran, en su inicio, patios abiertos, por lo cual era inviable su caracterización acústica original.

Se ha realizado un diseño arquitectónico con el fin de mejorar las condiciones acústicas de la nave central y convertirla en un espacio con las condiciones adecuadas para la emisión y escucha musical. Los niveles de presión sonora (SPL(A)) tienen una distribución homogénea por toda la sala, y el tiempo de reverberación y la claridad musical se encuentran dentro de los valores óptimos. Se puede concluir diciendo que el objetivo de caracterizar el estado acústico original de la nave central y su posterior mejora del acondicionamiento se ha alcanzado.

Se ha diseñado y acondicionado correctamente los otros dos espacios. La sala de conferencias es un espacio adecuado para el uso de la palabra, con un tiempo de reverberación, unos niveles de presión sonora con ponderación A, un STI ($>0,65$) y un valor de la definición ($>50\%$) óptimos para este uso, siendo más homogéneos. Lo mismo ocurre con la sala de exposiciones, donde se perseguía crear un espacio íntimo de visita y lo cual se ha conseguido rebajando el tiempo de reverberación a un valor medio de 0,7 segundos. En este caso, también se puede concluir diciendo que el objetivo de crear dos espacios con adecuadas condiciones acústicas para su uso como sala de conferencias y de exposiciones se ha cumplido.

Se ha calculado el coste aproximado de la reforma intentando que este fuera lo menor posible. Con un ajuste en los costes de materiales y mano de obra, por 90.000 euros se

podría realizar el acondicionamiento completo de una iglesia de tres naves, con obra de cierre de dos patios.

La última parte del trabajo ha consistido en la valoración y comparación de los dos programas usados durante todo el trabajo para realizar las simulaciones acústicas. Cada uno tiene sus pros y sus contras, el Odeon es mucho más intuitivo y sencillo de manejar pero con un coste de adquisición muy elevado, por otro lado, el CATT es un programa con un interfaz menos intuitivo pero con un coste de adquisición menor y una posibilidad mayor en cuanto a información acústica del espacio a simular.

Como conclusión general se puede decir que, con unos recursos económicos no excesivamente elevados, se puede realizar la rehabilitación completa de una iglesia y transformarla en un espacio multiusos. En este caso se partía de una nave central con dos patios abiertos y se ha conseguido un recinto multifuncional con auditorio musical, sala de conferencias y de exposiciones. La coyuntura actual ha hecho que se promuevan este tipo de intervenciones, por el ahorro que supone frente a la obra nueva. Este trabajo es un pequeño paso más en ese sentido, y puede servir de base para futuras intervenciones encaminadas a dar nuevos usos al patrimonio histórico.

Una posible línea de investigación futura sería la posibilidad de escuchar tanto conferencias en la sala para la palabra, como conciertos en el auditorio, en distintos puntos de la sala mediante la auralización. Otra posible línea de investigación futura sería el estudio de acondicionamiento llevado a cabo, utilizando materiales ecológicos de acondicionamiento que minimizaran su impacto en el medio ambiente.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ó. Bustamante Pineda, “‘Arquitectura del cielo’ Inventario arquitectónico de la iglesia de San Antonio,” *Fund. académica dibujo Prof.*, 2013.
- [2] J. I. Sánchez, “Apuntes de acondicionamiento acústico.” Valladolid, 2015.
- [3] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, and J. Algaba, “El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación,” Sevilla, pp. 103–139.
- [4] R. M. Capra, “Optimización del proyecto acústico de un recinto multiuso,” Universidad de Valladolid, 2013.
- [5] M. Revilla, “Caracterización acústica de la S.I. catedral de nuestra señora de la Asunción de Valladolid,” Universidad de Valladolid, 2012.
- [6] H. Arau, “Auditorios del siglo 21,” in *Tecniacústica 2005 - Terrasa*.
- [7] “Acústica arquitectónica,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ehu.eus/acustica/espanol/salas/acares/acares.html>.
- [8] A. Acustica, “REVISION DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN,” in *Tecniacústica 2010 - León*, 2010.
- [9] H. Arau, *ABC de la acústica arquitectónica*. 2007.
- [10] R. Onieva Onieva, “Diseño acústico de una sala multifunción mediante el empleo de paneles móviles,” 2013.
- [11] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2nd ed. 2009.
- [12] L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, 2nd ed. 2003.
- [13] “CTE DB-HR.” 2009.
- [14] Varios, “Tectónica 14 (Acústica).” 2002.
- [15] “Manual de Catt.” 2015.
- [16] D. Bravo, *Manual de Odeon*. .
- [17] “Video aéreo capilla San Antonio - Cali,” 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=0syizmqfO54>.
- [18] “Capilla de San Antonio desde el aire,” 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EfxuxQqK1CI>.
- [19] “Commercial Prices Odeon.” 2015.
- [20] “CATT - Acústica de salas.” [Online]. Available: http://www.caesoft.es/productos/CATT/Precios/precios_catt.htm.
- [21] “España es cultura. Teatro Calderón.” [Online]. Available: http://www.españacultura.es/es/espacios_culturales/valladolid/teatro_calderon_sala_principal.html.

- [22] “Fundación Villalar.” [Online]. Available: http://www.fundacionvillalarcyl.es/modulo/?refbol=actualidad&refsec=actualidad_de-interes.
- [23] “El Diario,” 2015. [Online]. Available: http://www.eldiario.es/politica/Comienza-constitucion-legislatura-Parlamento-andaluz_0_377962497.html.

ANEXO I: SIMULACIONES ACÚSTICAS INTERMEDIAS CON ODEON

En este anexo se comentarán las simulaciones intermedias. La simulación final presentada en la memoria es consecuencia de un proceso de prueba y error que ha durado meses. Durante estos meses de arduo trabajo, se han generado muchas simulaciones, en las cuales no se han obtenido unos resultados óptimos, pero que han servido de herramienta, sin la cual, no sería posible este trabajo.

Se hará una relación de todas ellas y se expondrán los cambios incluidos respecto a la anterior, con el fin de que se pueda seguir el proceso de investigación llevado a cabo. Como medio de ahorro en papel, los esquemas de las simulaciones se encuentran en el CD entregado con la memoria. En dichos esquemas, el parámetro viene especificado en letra negrita, y la frecuencia está incluida en la propia imagen.

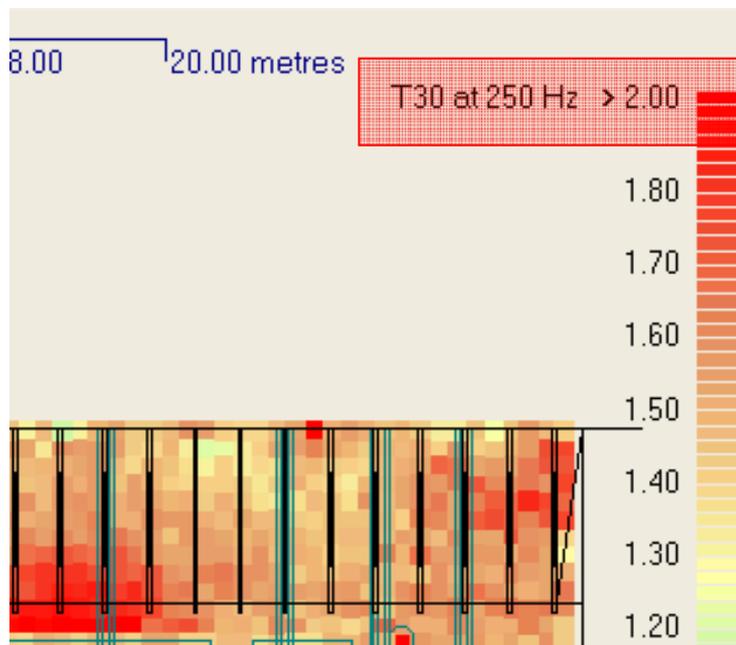


Figura A.1.- Referencia de la situación de la frecuencia en los esquemas de las simulaciones.

Se comenzará por las simulaciones de la sala de exposiciones, se continuará con la sala de conferencias y se finalizará con el auditorio.

El esquema seguido en el CD es el siguiente:

- CD
 - SIMULACIONES CON ODEON
 - Nave lateral izquierda – sala de exposiciones
 - Simulación 1.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf
 - Nave lateral derecha – sala de conferencias
 - Simulación 1.pdf
 - Simulación 2.pdf
 - Simulación 3.pdf
 - Simulación 4.pdf
 - Simulación 5.pdf
 - Simulación 6.pdf
 - Simulación 7.pdf
 - Simulación 8.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf
 - Nave central – auditorio
 - Simulación 1.pdf
 - Simulación 2.pdf
 - Simulación 3.pdf
 - Simulación 4.pdf
 - Simulación 5.pdf
 - Simulación inicial.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf

1. Sala de exposiciones

Simulación 1

En la primera simulación de la sala de exposiciones se decide colocar material absorbente en la zona más baja del falso techo y en la pared del fondo. Se obtiene un tiempo de reverberación demasiado alto por lo que se decide realizar una segunda simulación.

Simulación 2

En esta segunda simulación de la sala de exposiciones se decide aumentar la cantidad de material absorbente. Este material se coloca en todo el falso techo, en la pared del fondo y en dos paneles expositivos. Con ello se rebaja el tiempo de reverberación hasta unos valores que se consideran óptimos, por lo que se dan por finalizadas las simulaciones.

2. Sala de conferencias

Simulación 1

En esta primera simulación el falso techo, en parte equipotencial, se corta a un metro de la pared lateral para permitir una mayor entrada de luz natural y se plantea un mostrador de información en el acceso.

El tiempo de reverberación es alto, los niveles de presión sonora no tienen una distribución homogénea y la definición esta en valores bajos.

También se observa la aparición de zonas punteadas, a las cuales no se le encuentra explicación.

Simulación 2

En esta simulación se decide colocar toda la parte no equipotencial del techo en material absorbente. Se consigue una disminución del tiempo de reverberación, pero sus valores siguen estando 0,2 segundos por encima de los óptimos. Se siguen observando puntos aislados con valores anormales.

Simulación 3

Esta simulación y la siguiente tienen como fin encontrar el problema de los puntos con valores anormales, y si es posible, eliminarlo. Para ello se realiza una distribución simétrica de los elementos (techo, estrado y público) y materiales en la sala, asignando el material cal a todos los elementos verticales (paredes, ventanas y puertas). Siguen observándose dichos puntos, con lo que no se ha solucionado el problema. Se decide continuar con las simulaciones a pesar de esta situación.

Simulación 4

Se decide asignar los materiales correctos a los elementos de la sala, sin que desaparezca el problema de la aparición de los puntos con lo que se avanza a pesar de su presencia.

Simulación 5

Para esta simulación se asigna material absorbente a la parte no equipotencial del falso techo y a la pared de la zona de acceso. Con ello se reduce el tiempo de reverberación a unos valores óptimos, pero se sigue con el problema de la aparición de los valores puntuales.

Simulación 6

Esta simulación se corresponde con el modelizado de esta sala con el techo plano.

Simulación 7

Debido a que en la nave central existía la misma problemática con la aparición de los valores puntuales anormales, y se consigue solucionar, se decide tomar la misma medida en este caso. Se rebaja la caja de modelizado del público a 0,4 metros y se observa que desaparecen los valores puntuales.

Simulación 8

Debido a que en la simulación 7 se observa una zona con un tiempo muy alto de reverberación en la zona de la puerta de acceso a la nave central, se decide la colocación de un panel de material absorbente delante de la misma. Desaparece este problema y se rebaja mínimamente el tiempo de reverberación, se establecen unos valores óptimos del STI y de la definición, así como unos niveles homogéneos de presión sonora en toda la sala, por lo que se dan por finalizadas las simulaciones de esta sala.

3. Auditorio

Simulación inicial

La simulación inicial, como se ha comentado, sirve para conocer las condiciones acústicas originales de la nave central. Como es de esperar, se obtienen unos valores muy altos del tiempo de reverberación, una distribución homogénea de los valores de los niveles de presión sonora y una claridad musical muy mala.

Simulación 1

Esta simulación se realiza con un modelizado de público a nivel de suelo y de 1,20 metros de altura y el cierre de la nave en su parte trasera para reducir el volumen. Se observa la aparición, como en la sala de conferencias, de unos puntos con valores anormales. Se consigue una reducción de los valores del tiempo de reverberación hasta unos niveles que podrían considerarse óptimos y unos valores de los niveles de presión sonora poco homogéneos.

Simulación 2

Después de la simulación 1, hay un replanteo de la situación. Se decide incluir una grada para el público y un panel trasero que dirija las reflexiones hacia la parte trasera de la grada. La grada se modeliza con un peldañado que represente el público. El tiempo de reverberación se mantiene respecto a la anterior simulación y los valores de los niveles de presión sonora son más homogéneos. Se siguen observando los puntos con valores anormales.

Simulación 3

Esta simulación es similar a la anterior, pero con la colocación de dos fuentes sonoras en vez de 1. Los valores del tiempo de reverberación son iguales a los de la anterior simulación.

Simulación 4

En esta simulación se decide cambiar el tamaño del mallado a 0,20 metros como método de posible corrección de los valores anormales. No desaparecen.

Simulación 5

Ante la persistencia en la aparición de los puntos, se decide modelizar la grada con otro sistema. Se opta por la modelización en forma de rampa y con una altura de 0,40 metros, y se observa la desaparición de los puntos. Los valores de los parámetros son los mismos de la simulación 3. Todos ellos son valores óptimos y los niveles de presión sonora tienen una distribución homogénea. Se dan por concluidas las simulaciones de esta sala.

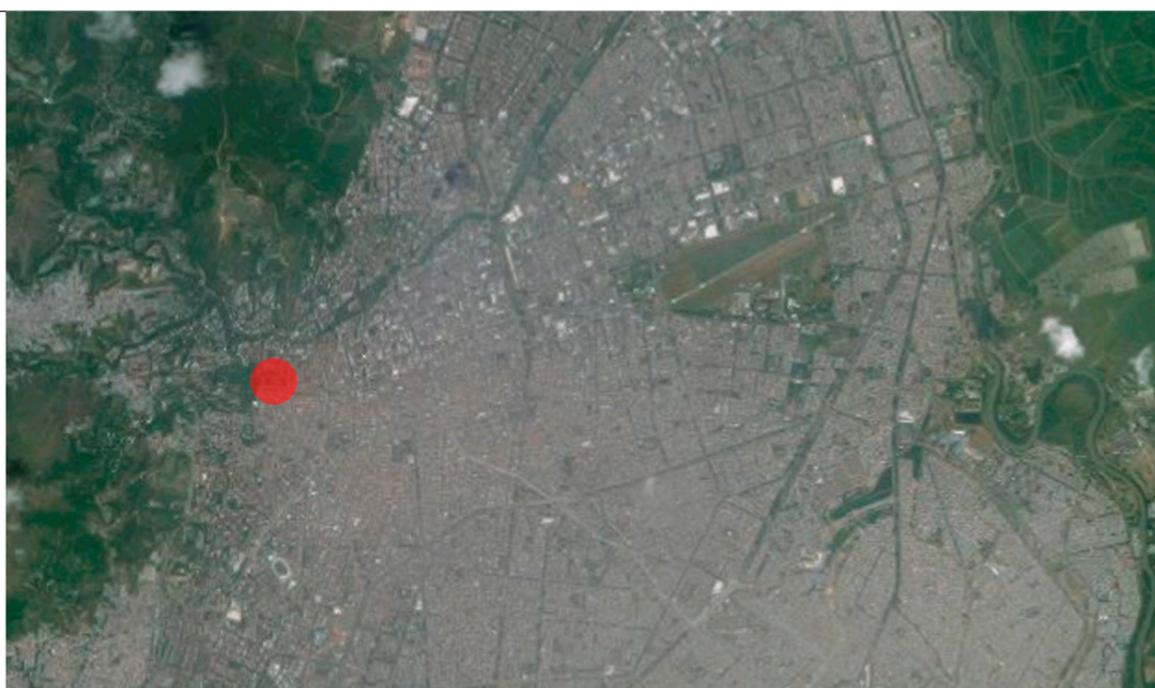
ANEXO II: SIMULACIONES ACÚSTICAS CON CATT

Al igual que en el caso anterior, las simulaciones realizadas con CATT se encuentran en el CD adjunto a las memorias. En este caso, solo se han realizado las simulaciones con las condiciones finales para cada sala. Sigue el siguiente esquema en el CD:

- CD
 - SIMULACIONES CON CATT
 - Nave lateral izquierda – sala de exposiciones
 - Simulación final.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf
 - Nave lateral derecha – sala de conferencias
 - Simulación final.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf
 - Nave central – auditorio
 - Simulación final.pdf
 - Tiempo de reverberación, caídas y T30.pdf

ANEXO III: PLANOS DE LA IGLESIA

- 1- Plano de situación**
- 2- Plano de alzado frontal original y después de la reforma**
- 3- Plano de alzado lateral original**
- 4- Plano de alzado lateral después de la reforma**
- 5- Plano de planta acotado**
- 6- Plano de la planta original**
- 7- Plano de la planta después de la reforma**
- 8- Plano de la sección transversal original y después de la reforma**
- 9- Plano de la sección longitudinal de la nave central original**
- 10- Plano de la sección longitudinal del auditorio**
- 11- Plano de la sección longitudinal de la sala de conferencias y de la sala de exposiciones**



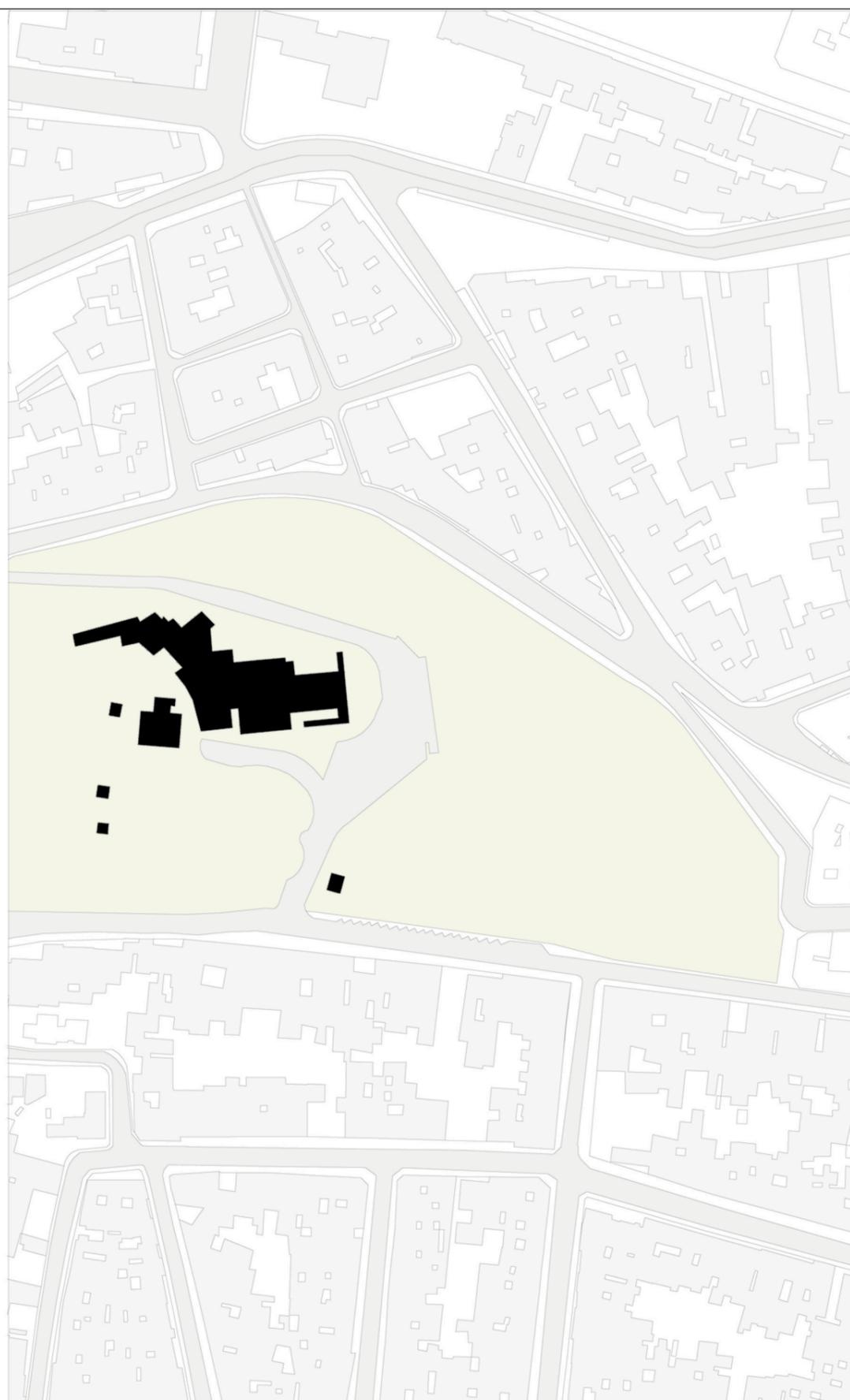
CALI



BARRIO DE SAN ANTONIO



IGLESIA DE SAN ANTONIO



ENTORNO DE LA IGLESIA

MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

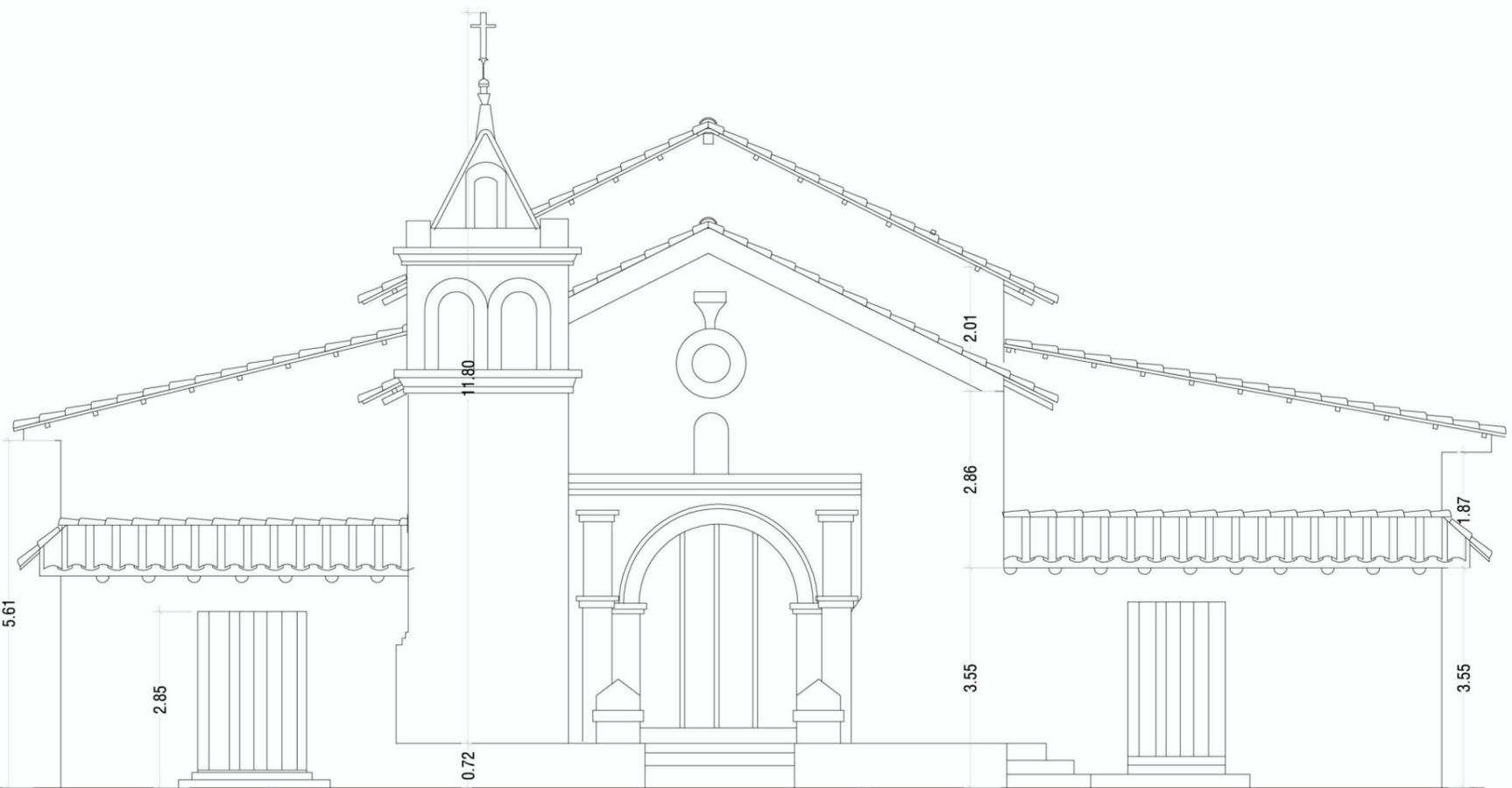
PLANO: PLANO DE SITUACIÓN

ESCALA: 1:1.000

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

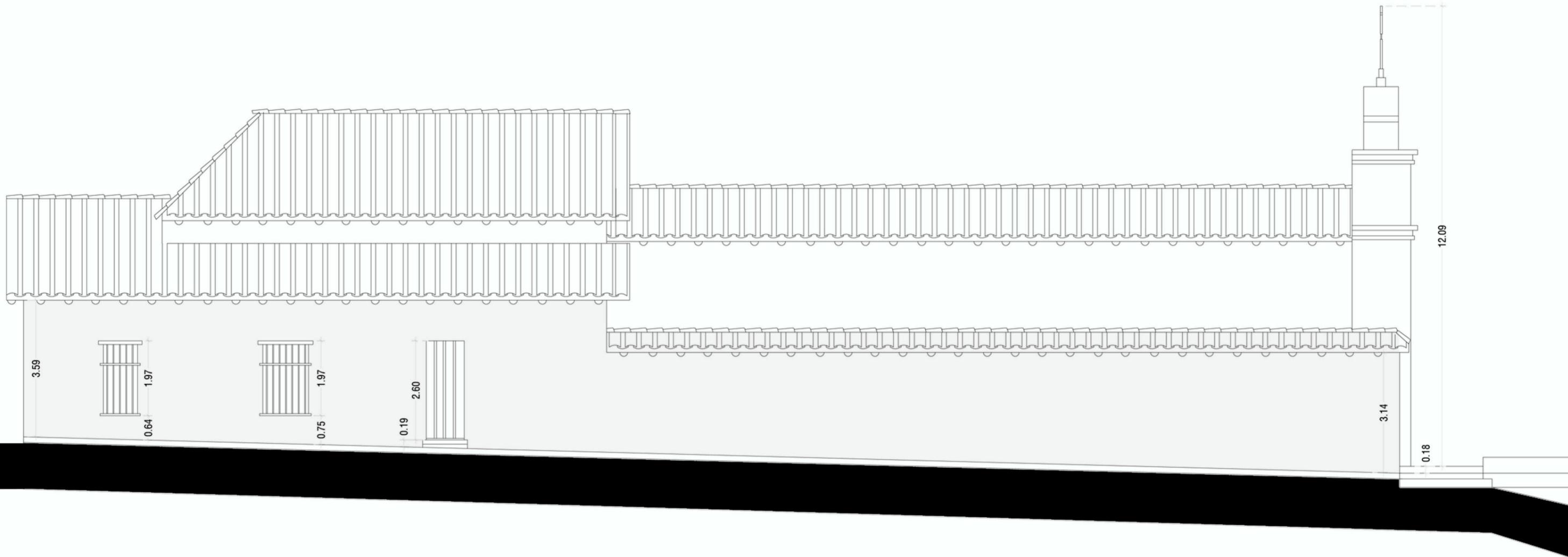
ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EX- POSICIONES

PLANO: ALZADO FRONTAL ORIGINAL Y DESPUÉS DE LA REFORMA

ESCALA: 1:100 JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

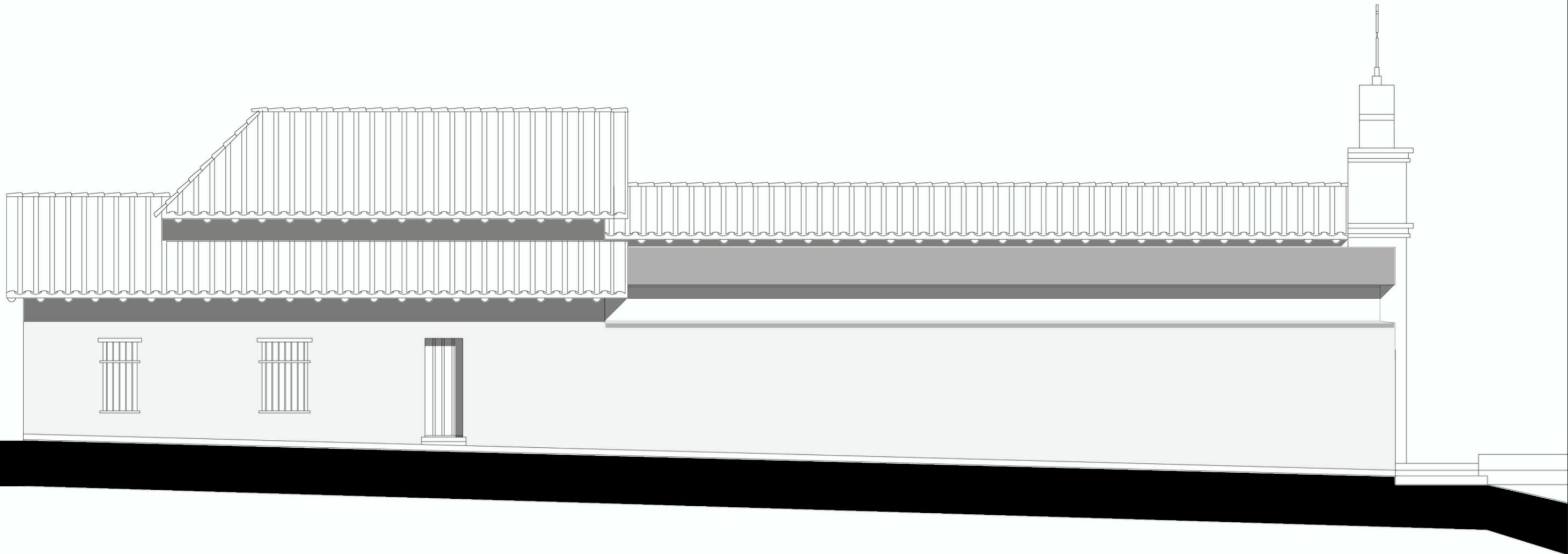
PLANO: ALZADO LATERAL ORIGINAL Y DESPÚES DE LA REFORMA

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

PLANO: ALZADO LATERAL ORIGINAL Y DESPÚES DE LA REFORMA

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

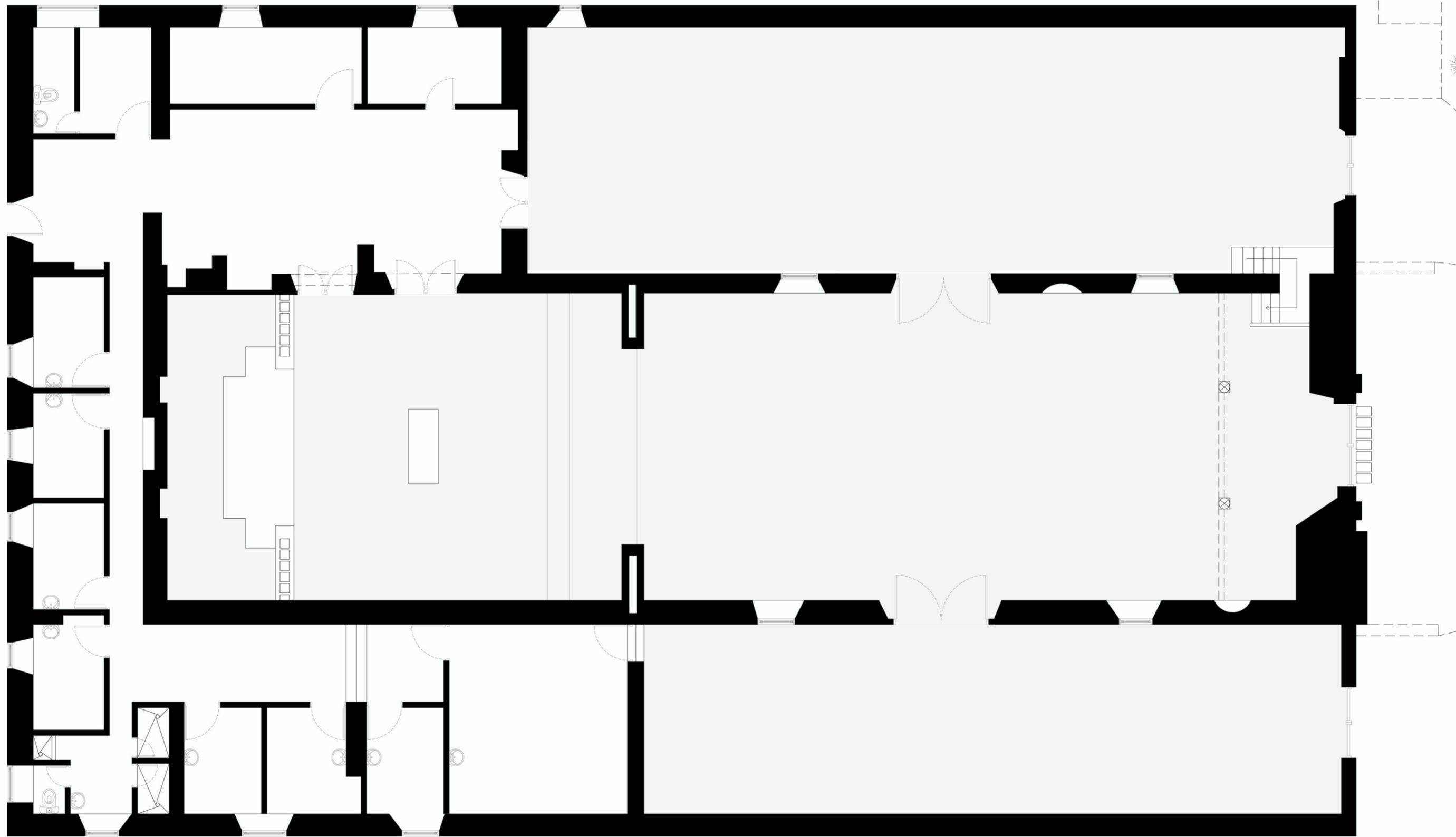
PLANO: PLANTA ORIGINAL ACOTADA

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

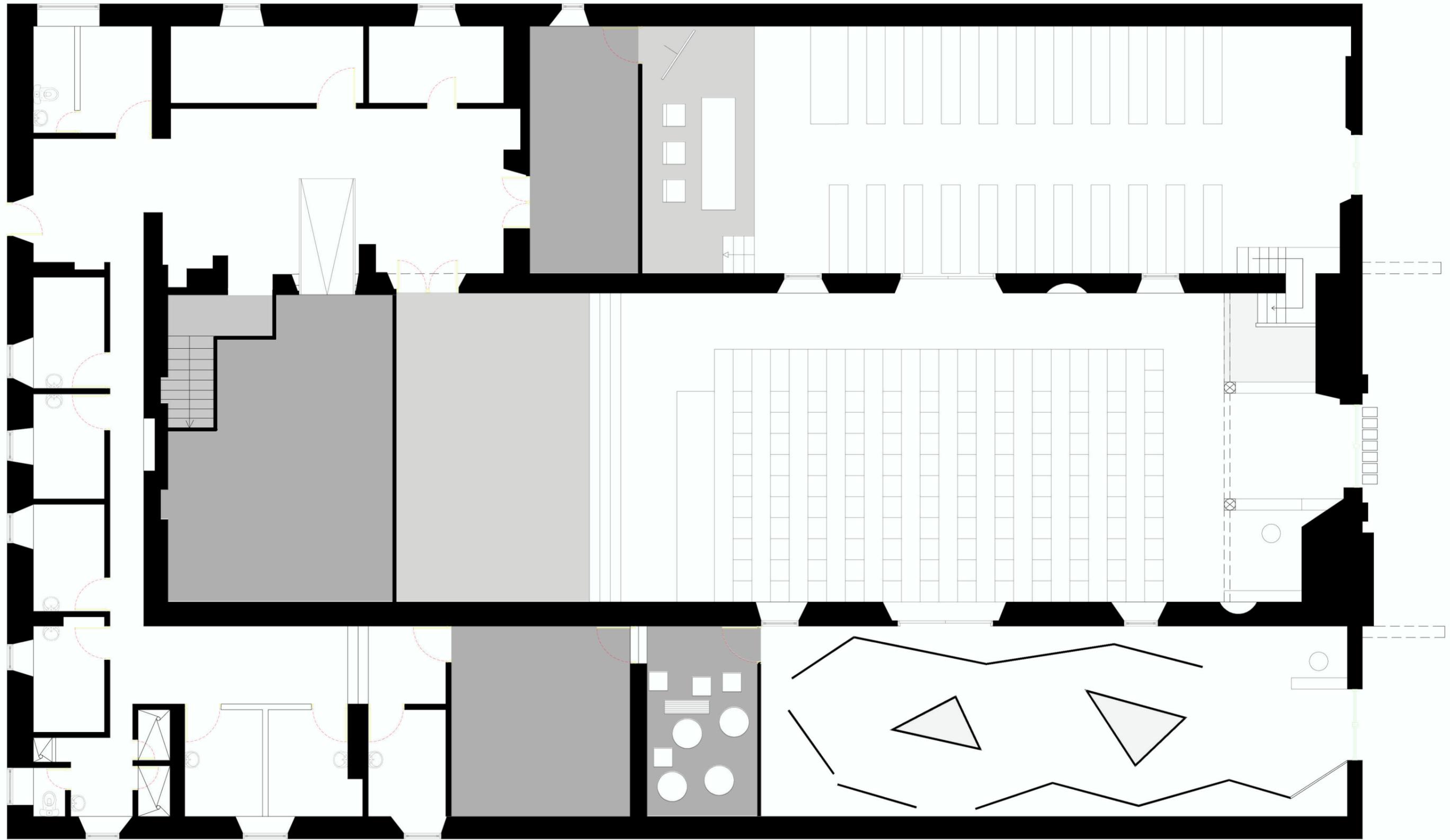
PLANO: PLANTA ORIGINAL

ESCALA: 1:100

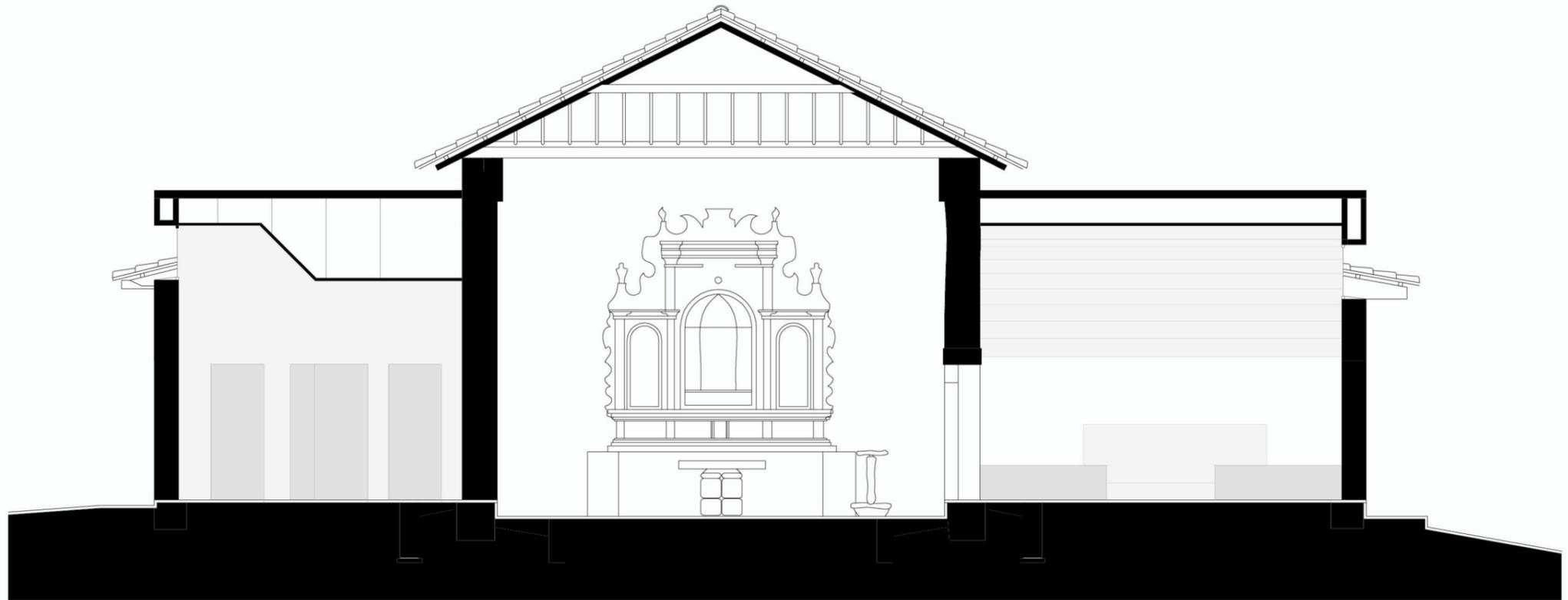
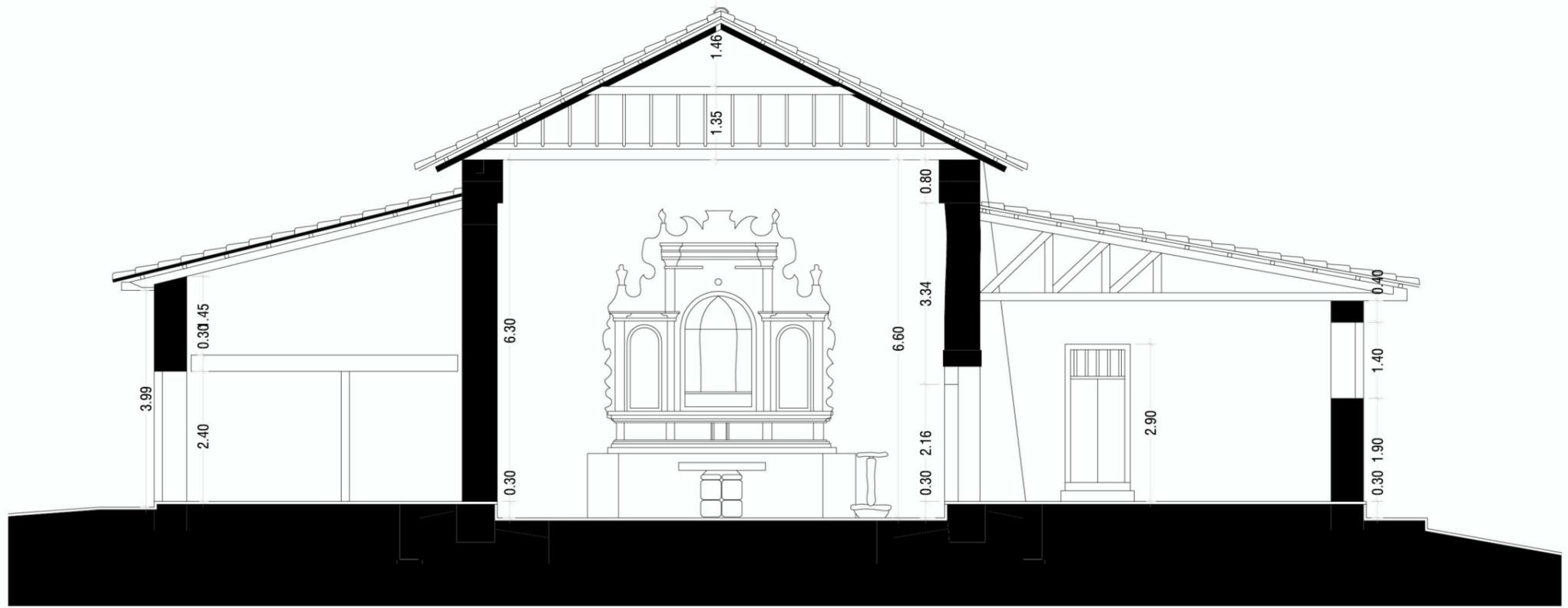
JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

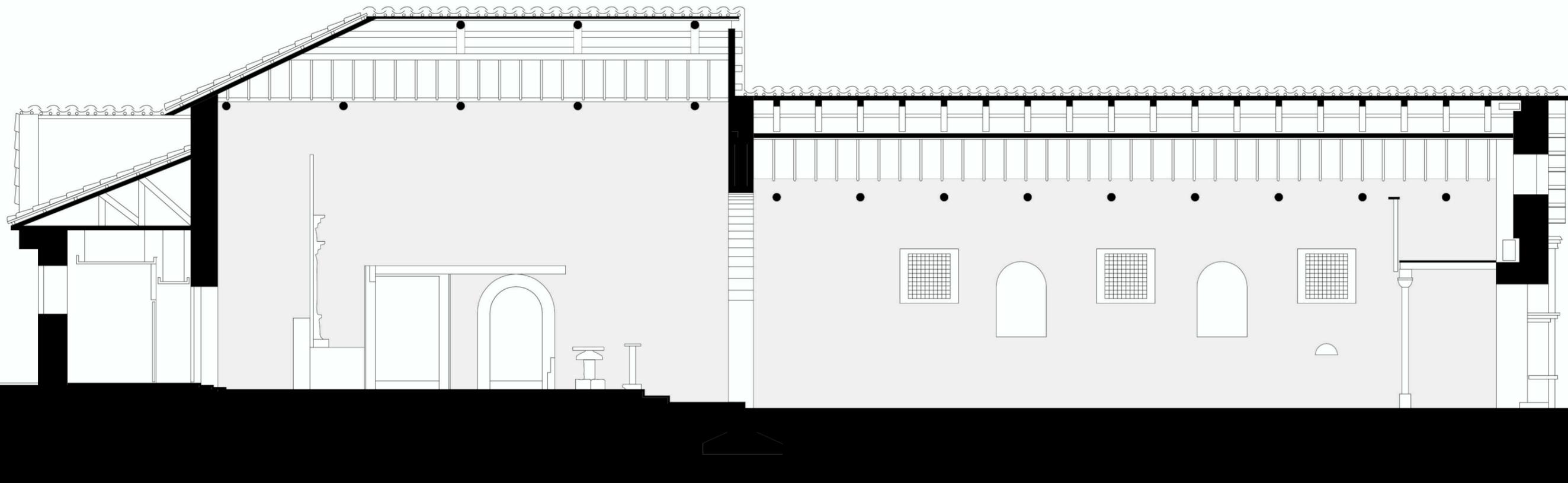
Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES		
TRABAJO FIN DE MÁSTER		
ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES		
PLANO: PLANTA DESPUES DE LA REFORMA		
ESCALA: 1:100	JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES	
FECHA: 17-6-2015	Firmado:	7



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES		
TRABAJO FIN DE MÁSTER		
ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES		
PLANO: SECCIÓN TRANSVERSAL ORIGINAL Y DESPUÉS DE LA REFORMA		
ESCALA:	1:100	JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES
FECHA:	17-6-2015	Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

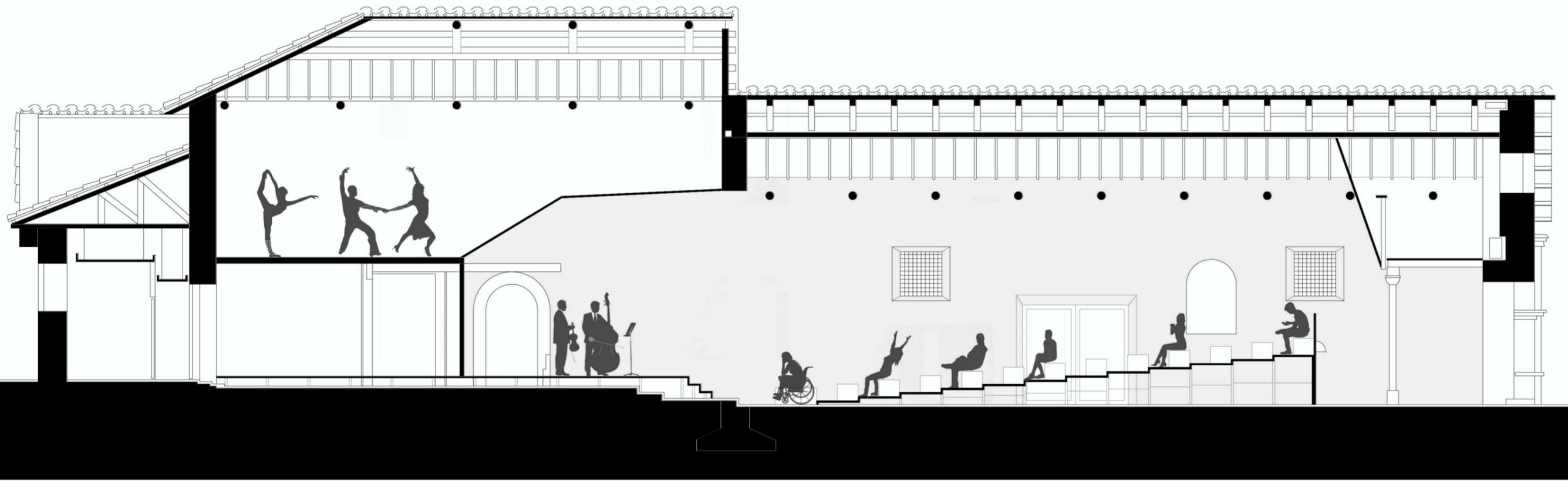
PLANO: SECCION LONGITUDINAL DE LA NAVE CENTRAL

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

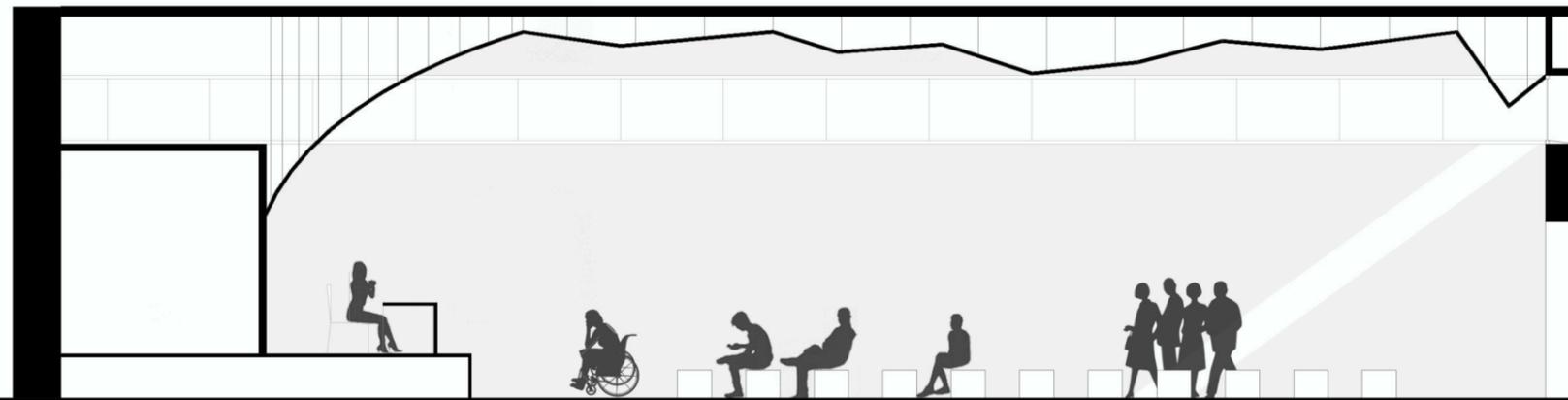
PLANO: SECCION LONGITUDINAL DEL AUDITORIO

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado:



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN REHABILITACIÓN DE RECINTO RELIGIOSO COMO AUDITORIO, SALA DE CONFERENCIAS Y DE EXPOSICIONES

PLANO: SECCIONES TRANSVERSALES DE LA SALA DE EXPOSICIONES Y CONFERENCIAS

ESCALA: 1:100

JOSÉ MANUEL VALVERDE FUENTES

FECHA: 17-6-2015

Firmado: