



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**MÁSTER DE POSTGRADO EN
INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES**

PROYECTO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO ACÚSTICO DE LA IGLESIA DE LA VERA
CRUZ EN SEGOVIA**

Juan Moreno de Santos

Tutor: José Ignacio Sánchez Rivera

Valladolid, Septiembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas las personas que han facilitado la realización de este trabajo, empezando por el tutor, José Ignacio. Siguiendo por la Soberana Orden Militar y Hospitalaria de San Juan de Jerusalén, de Rodas y de Malta, agradeciéndole darnos la posibilidad de realizar las mediciones *in situ* en la iglesia. Agradecer también a quienes ayudaron en dicha medición, María y José Manuel, a quien agradezco inmensamente la ayuda en el proceso de exportación del modelo digital de AutoCAD al CATT Acoustic. Gracias a mi tío Juan, por facilitarme toda la bibliografía sobre la iglesia que, sin duda, ha ayudado a realizar una contextualización más precisa y completa de lo esperado. Gracias también a Patricia por acompañarme y ayudarme a hacer las fotos y montajes de la iglesia, y por leerse tantas veces el trabajo. Y por supuesto gracias a mis padres, mi hermana y mis abuelos por ayudarme en lo que han podido e interesarse en todo momento.

ABSTRACT

La acústica de salas es una disciplina que se ha desarrollado recientemente apoyándose en los conocimientos aportados por la acústica física. Sin embargo, actualmente se recurre a la ayuda electrónica para sonorizar un espacio, mientras que en la antigüedad, sin los conocimientos actuales, se construían grandes espacios con las cualidades acústicas precisas que se necesitaban.

La iglesia de la Vera Cruz de Segovia, que data de principios del siglo XIII, tiene una geometría extraordinaria y nada común, ya que es una iglesia con doble estructura en su planta, circular y longitudinal. Fue obra de la Orden del Santo Sepulcro, aunque esto no está del todo claro, puesto que algunos historiadores afirman que fue obra de los Caballeros del Temple. Inicialmente se realiza una contextualización histórica y se describen las celebraciones que podían llevarse a cabo en el interior de la iglesia.

En este trabajo se pretende realizar un análisis acústico de la misma para conocer su comportamiento. Apoyándose en las herramientas actuales, tales como instrumentación de medida, programas informáticos, etc., se va a observar el comportamiento acústico de un recinto que fue realizado con el único conocimiento de la experiencia previa.

El objetivo es intentar concluir si esta geometría tan compleja y única tiene una utilidad acústica, más allá del significado religioso que pueda tener, y observar si el comportamiento y las características acústicas permite todas las posibles celebraciones o solo es apropiada para alguna de ellas.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE GRÁFICOS	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVOS	9
1.2 MOTIVACIÓN SOBRE EL TEMA	10
1.3 MOTIVACIÓN SOBRE EL RECINTO	11
2 LA IGLESIA DE LA VERA CRUZ: LA IGLESIA DE LOS TEMPLARIOS	13
2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	13
2.2 CONTEXTO E HISTORIA	14
2.3 EL TEMPLO	19
2.3.1 LOS RITOS DE LA ORDEN	23
2.3.2 EL CANTO GREGORIANO	25
2.3.2.1 Características	25
2.3.2.2 Formas	26
2.4 SINGULARIDADES DE LA VERA CRUZ	27
2.4.1 ANTECEDENTES: IGLESIAS DE PLANTA CIRCULAR.	27
2.4.1.1 Basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén	27
2.4.1.2 Iglesia de Santa Constanza, Roma.	28
2.4.1.3 Iglesia de San Vital de Rávena.	29
2.4.1.4 Capilla Palatina de Aquisgrán.	30
2.4.1.5 Iglesia del Santo Sepulcro, Cambridge.	31
2.4.2 GEOMETRÍA	32
3 ACÚSTICA: LA TEORÍA	43
3.1 CONCEPTOS PREVIOS	43
3.2 MÉTODOS DE ESTUDIO ACÚSTICO DE RECINTOS	46
3.2.1 ACÚSTICA GEOMÉTRICA	47
3.2.2 ACÚSTICA ESTADÍSTICA	50
3.3 PARÁMETROS	51
3.3.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN	51
3.3.2 C80	54

3.3.3	STI	55
3.4	CATT ACOUSTIC	56
3.4.1	CREACIÓN DEL MODELO	56
3.4.2	TRAZADO DE RAYOS	57
3.4.3	PARÁMETROS Y HERRAMIENTAS	59
4	DESARROLLO DEL TRABAJO	61
4.1	LEVANTAMIENTO DE PLANIMETRÍA	61
4.1.1	DIFICULTADES CON LA DOCUMENTACIÓN EXISTENTE	61
4.1.2	ELABORACIÓN DE PLANIMETRÍA PROPIA	63
4.1.3	MATERIALES	65
4.1.4	VOLUMETRÍA	66
4.2	TOMA DE DATOS ACÚSTICOS	69
4.2.1	GUION	70
4.2.2	MEDICIÓN	71
4.2.3	DIFICULTADES EN LA MEDICIÓN	73
4.3	RESULTADOS DE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i>	74
4.4	MODELO DIGITAL	77
4.4.1	AJUSTE DEL MODELO DIGITAL	78
4.4.1.1	Materiales	80
5	RESULTADOS	81
5.1	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	82
5.2	CAMPO ACÚSTICO	84
5.3	C80	88
5.4	STI	90
5.5	PARÁMETROS EN RECEPTORES	93
5.6	TRAZADO DE RAYOS	105
5.7	VIDEOS DE PROPAGACIÓN	107
6	CONCLUSIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	111
	REFERENCIAS DIGITALES DE IMÁGENES	112
	ANEXOS	113
	ÍNDICE DE FIGURAS	114
	ÍNDICE DE GRÁFICOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	115
ÍNDICE DE TABLAS	116
ANEXO I: DOCUMENTACIÓN PREVIA	117
PLANIMETRÍA MERINO DE CÁCERES	117
ALZADOS ENCICLOPEDIA DEL ROMÁNICO	119
INFORME DEL CONDE DE CEDILLO	122
ANEXO II. FOTOGRAFÍAS DE LA IGLESIA	123
ANEXO III: MATERIALES CATT	127
ANEXO IV: RESULTADOS DE LA MEDICIÓN ACÚSTICA <i>IN SITU</i>	129
TIEMPO DE REVERBERACIÓN	129
DISTRIBUCIÓN DE NIVELES	130
ANEXO V: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ACÚSTICA EN CATT	134
ANEXO VI: PLANIMETRÍA	153
PLANO 1. PLANO DE SITUACIÓN	155
PLANO 2. PLANTA PRINCIPAL	157
PLANO 3. PLANTA CON ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL	159
PLANO 4. SECCIÓN LONGITUDINAL, EJE ESTE-OESTE	161
ANEXO VII: GUIONES	163
PLANO 5. GUIÓN PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. PLANTA PRINCIPAL	165
PLANO 6. GUIÓN PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. PLANTA CON ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL	167
PLANO 7. GUIÓN PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. SECCIÓN LONGITUDINAL, EJE ESTE-OESTE	169

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1. SECCIÓN TRANSVERSAL (EJE NORTE-SUR) DE LA IGLESIA CON LA ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO EN SU SUPUESTO ESTADO ORIGINAL. FUENTE: MERINO DE CÁCERES, 1998.	34
FIGURA 3-1. PRINCIPIO DE HUYGENS: A) FRENTE DE ONDA; B) Y C) FENÓMENOS DE DIFRACCIÓN. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SERRANO, 2011.	46
FIGURA 3-2. GRÁFICO EN EL TIEMPO DE LA RECEPCIÓN DEL SONIDO DIRECTO, PRIMERAS REFLEXIONES Y COLA REVERBERANTE.	46
FIGURA 3-3. MODOS DE REPRESENTAR LA REFLEXIÓN ESPECULAR: A) LEY DE SNELL: ÁNGULO DE INCIDENCIA IGUAL AL ÁNGULO DE REFLEXIÓN. ELABORACIÓN PROPIA), B) FOCO IMAGEN. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.	47
FIGURA 3-4. REFLEXIONES SOBRE UNA SUPERFICIE CURVA: A) FUENTE EN EL CENTRO Y CUALQUIER POSICIÓN DE LA SALA; B) FUENTE CERCA DEL PERÍMETRO. FUENTE; LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.	48
FIGURA 3-5. REFLEXIONES SOBRE UN TECHO ABOVEDADO. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.	49
FIGURA 3-6. HIPÉRBOLA DE ECO. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.	50
FIGURA 3-7. ORIENTACIÓN EN QUE DEBE SITUARSE EL MODELO. FUENTE: AA. VV., 2002.	56
FIGURA 4-1. PLANTAS Y SECCIONES ENCONTRADAS EN: A) MERINO DE CÁCERES, 1998; B) ÁLVAREZ MORA ET AL, 1994; C) GARCÍA ATIENZA, 1995.	61
FIGURA 4-2. DIMENSIONES Y PLANTA TOMADAS COMO BASE. FUENTE: DE LOJENDIO Y RODRÍGUEZ, 1985.	62
FIGURA 4-3. PLANO ACOTADO DE LA PLANTA PRINCIPAL, CON LOS MATERIALES Y ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS.	64
FIGURA 4-4. MODELO COMPLETO FINAL.	66
FIGURA 5-1. COMPARATIVA ENTRE EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN CON EL RECINTO VACÍO Y CON AUDIENCIA.	82
FIGURA 5-2. VOLUMEN TOTAL DE LA IGLESIA, APORTADO POR CATT ACOUSTIC, Y GRÁFICO DE VALORES RECOMENDABLES DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN RELACIÓN AL VOLUMEN DEL RECINTO: 1- SALAS PARA LA PALABRA Y MÚSICA DE ÓRGANO; 2- SALAS PARA MÚSICA SINFÓNICA; 3- SALAS PARA MÚSICA DE CÁMARA, ÓPERAS; 4- SALAS MULTIUSOS, SALAS PARA MUSICALES Y TEATRO DE DRAMA; 5- AUDITORIOS DE LECTURA, SALAS DE CONFERENCIAS, SALAS DE CINE.	83
FIGURA 5-3. COMPARATIVA DE LOS HISTOGRAMAS PARA FUENTE EN F1 –IZQUIERDA- Y FUENTE EN F2 –DERECHA-.	87
FIGURA 5-4. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S2 CON LA FUENTE F1.	94
FIGURA 5-5. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S4 CON LA FUENTE F1.	95
FIGURA 5-6. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S6 CON LA FUENTE F1.	96
FIGURA 5-7. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S7 CON LA FUENTE F1.	97

FIGURA 5-8. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S9 CON LA FUENTE F1.....	98
FIGURA 5-9. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S2 CON LA FUENTE F2.....	99
FIGURA 5-10. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S4 CON LA FUENTE F2.....	100
FIGURA 5-11. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S6 CON LA FUENTE F2.....	101
FIGURA 5-12. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S7 CON LA FUENTE F2.....	102
FIGURA 5-13. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S9 CON LA FUENTE F2.....	103
FIGURA 5-14. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S10 CON LA FUENTE F2.....	104
FIGURA 5-15. PLANTA DEL TRAZADO DE RAYOS DE LOS CASOS F1xS1, F2xS1, F1xS2, F2xS2, F1xS6, F1xS7.....	105
FIGURA 5-16. COMPARATIVA DEL TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN LAS POSICIONES S9 Y S10 PARA LA FUENTE F2.....	106
FIGURA 5-17. PLANTA DEL TRAZADO DE RAYOS EN LOS CASOS F2xS2, F2xS3, F2xS4, F2xS6 Y F1xS10; ALZADO F2xS10.....	107
FIGURA 5-18. CAPTURAS DE LOS VÍDEOS DE PROPAGACIÓN DE LAS FUENTES F1, ARRIBA, Y F2, ABAJO...	107

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3-1. GRÁFICA PARA REALIZAR SUMAS DE NIVELES DE INTENSIDAD. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SERRANO, 2011.....	45
GRÁFICO 3-2. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA CON EL TIEMPO. FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.....	51
GRÁFICO 3-3. DEFINICIÓN GRÁFICA DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN. FUENTE; LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.....	52
GRÁFICO 3-4. PROCESOS DE ASCENSO Y DESCENSO DE LA DENSIDAD DEL SONIDO EN ESCALA LINEAL (A TRAZOS) Y LOGARÍTMICA (CONTINUA). FUENTE: LLINARES, LLOPIS Y SANCHO, 2011.....	52
GRÁFICO 3-5. TIEMPO DE REVERBERACIÓN RECOMENDADO PARA MEDIAS FRECUENCIAS (500-1000 Hz) EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN Y USO DE LA SALA. 1- SALAS PARA LA PALABRA Y MÚSICA DE ÓRGANO; 2- SALAS PARA MÚSICA SINFÓNICA; 3- SALAS PARA MÚSICA DE CÁMARA, ÓPERAS; 4- SALAS MULTIUSOS, SALAS PARA MUSICALES Y TEATRO DE DRAMA; 5- AUDITORIOS DE LECTURA, SALAS DE CONFERENCIAS, SALAS DE CINE.....	54
GRÁFICO 4-1. COMPARACIÓN DE NIVEL EQUIVALENTE, EN DBA, OBTENIDO EN CADA PUNTO PARA CADA POSICIÓN DE FUENTE.....	74

GRÁFICO 4-2. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES POR FRECUENCIAS EN TODAS LAS POSICIONES DE RECEPCIÓN CON LA FUENTE EN F1.	75
GRÁFICO 4-3. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES POR FRECUENCIAS EN TODAS LAS POSICIONES DE RECEPCIÓN CON LA FUENTE F2.	75
GRÁFICO 4-4. TIEMPO DE REVERBERACIÓN OBTENIDO MEDIANTE LA EXPLOSIÓN DE GLOBOS GRANDES.	76
GRÁFICO 4-5. TIEMPO DE REVERBERACIÓN OBTENIDO MEDIANTE LA INTERRUPCIÓN DE EMISIÓN DE SONIDO.	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 2-1. VISTA EXTERIOR DE LA IGLESIA. FOTOGRAFÍA PROPIA.	13
ILUSTRACIÓN 2-2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA IGLESIA DE LA VERA CRUZ Y LOS PRINCIPALES MONUMENTOS DE SEGOVIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE CAPTURAS DE GOOGLE EARTH.	14
ILUSTRACIÓN 2-3. LOSA CON LA INSCRIPCIÓN DE LA CONSAGRACIÓN DE LA IGLESIA. FOTOGRAFÍA PROPIA.	15
ILUSTRACIÓN 2-4. INSCRIPCIÓN EN LA QUE SE INDICA EL CAMBIO DE PERTENENCIA DE LA IGLESIA. FOTOGRAFÍA PROPIA.	18
ILUSTRACIÓN 2-5. PLANTAS DE IGLESIAS DE “EL TEMPLE” DE PARÍS, SEGOVIA, LAON, METZ Y MONMORILLON. FUENTE: LENOIR, 1852.	21
ILUSTRACIÓN 2-6. PLANTAS DE LA BASÍLICA DEL SANTO SEPULCRO DE JERUSALÉN: SIGLO IV, IZQUIERDA; ACTUAL, DERECHA. FUENTES: IZQUIERDA, CIRCULO-ROMANICO.COM; DERECHA, WIKIPEDIA.	28
ILUSTRACIÓN 2-7. PLANTAS DE LA IGLESIA DE SANTA CONSTANZA: ORIGINAL, IZQUIERDA Y ACTUAL, DERECHA.	29
ILUSTRACIÓN 2-8. PLANTAS DE LA IGLESIA DE SAN VITAL DE RÁVENA. FUENTES: LENOIR, IZQUIERDA; WIKIPEDIA, DERECHA.	29
ILUSTRACIÓN 2-9. PLANTA DE LA CAPILLA PALATINA DE AQUISGRÁN: ORIGINAL, IZQUIERDA Y ACTUAL, DERECHA.	30
ILUSTRACIÓN 2-10. PLANTA DE LA IGLESIA DEL SANTO SEPULCRO DE CAMBRIDGE: ORIGINAL, IZQUIERDA Y ACTUAL, DERECHA. FUENTE: PLANTACENTRAL.WIX.COM.	31
ILUSTRACIÓN 2-11. ESQUEMA ORGANIZATIVO DE LA PLANTA. FUENTE: MERINO DE CÁCERES, 1998.	32
ILUSTRACIÓN 2-12. ANTEPECHO DE LA ESCALERA. MONTAJE A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	35
ILUSTRACIÓN 2-13. NICHOS CON LAS IMÁGENES DE LOS PATRONES DE LA ORDEN DE MALTA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	36
ILUSTRACIÓN 2-14. VENTANAS DE LA ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL Y PUERTA DE ACCESO A LA ESTANCIA DE RETIRO. MONTAJE A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	37
ILUSTRACIÓN 2-15. ESTANCIA DE RECOGIMIENTO VISTA DESDE FUERA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	38
ILUSTRACIÓN 2-16. BÓVEDA ‘CORDOBESA’. MONTAJE A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	38
ILUSTRACIÓN 2-17. FRONTALES Y PARTE POSTERIOR (DERECHA) DEL ALTAR DE LA ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	39

ILUSTRACIÓN 2-18. IMAGEN DE CRISTO CRUCIFICADO DELANTE DE LA VENTANA DEL ÁBSIDE PRINCIPAL. FOTOGRAFÍA PROPIA.	40
ILUSTRACIÓN 3-1. CAPTURAS DEL TRAZADO DE RAYOS CON LOS FOCOS IMAGEN REPRESENTADOS.	58
ILUSTRACIÓN 3-2. CAPTURA DE LA VENTANA QUE MUESTRA EL TRAZADO DE RAYOS DESDE UNA FUENTE A UN RECEPTOR.	58
ILUSTRACIÓN 4-1. RETABLO DE LA RESURRECCIÓN, UBICADO EN EL LIENZO NORTE. FOTOGRAFÍA PROPIA.	65
ILUSTRACIÓN 4-2. SECCIONES DE LA BÓVEDA DEL DEAMBULATORIO A LAS QUE SE ADOSAN LOS ÁBSIDES.	67
ILUSTRACIÓN 4-3. CAPTURA DEL MODELO CON LOS MATERIALES.	80
ILUSTRACIÓN 5-1. MAPA ACÚSTICO DE LA IGLESIA CON LA FUENTE EN LA POSICIÓN F1.	81
ILUSTRACIÓN 5-2. COMPARATIVA DE MAPAS DE SPL DIRECTO Y SPL CAUSADOS POR AMBAS FUENTES, F1 Y F2. EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL MAPA DE LA ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL.	85
ILUSTRACIÓN 5-3. COMPARATIVA DE MAPAS E HISTOGRAMAS DE LOS RESULTADOS DE C80 PARA LA FUENTE EN LA POSICIÓN F1 Y F2. EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL MAPA DE LA ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL.	89
ILUSTRACIÓN 5-4. COMPARATIVA DE MAPAS E HISTOGRAMAS DE LOS RESULTADOS DE C80 PARA LA FUENTE EN LA POSICIÓN F1 Y F2. EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL MAPA DE LA ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL.	91

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1. TABLA DE VALORES RECOMENDADOS DE STI.	55
TABLA 4-1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN MEDIO MEDIDO UTILIZADO DE REFERENCIA EN CATT.	78
TABLA 4-2. TABLA DE MATERIALES EMPLEADOS EN CATT.	80

1. INTRODUCCIÓN

Este documento parte como trabajo final del Máster de Acústica y Vibraciones impartido conjuntamente por la Universidad de León y la Universidad de Valladolid.

La historia de la acústica de salas ha sufrido un fuerte cambio en el último siglo, convirtiéndose prácticamente en una ciencia lo que tiempo atrás era un campo basado casi en su totalidad en la experiencia. Recientemente se ha desarrollado tanto instrumentación física como programas informáticos que permiten un estudio muy detallado de las condiciones acústicas de un recinto, más allá de la acústica geométrica. Con la simulación acústica se obtiene un mayor grado de detalle en el análisis de los parámetros acústicos, además de poder conocer el comportamiento del sonido en un recinto. El proceso de creación de un modelo acústico tiene gran complejidad, mayor aún en este caso puesto que no se ha realizado ninguno previamente, pero los resultados obtenidos aportan claridad a la comprensión de la sala.

El caso del recinto elegido es especial. Se trata de una iglesia singular y única, de finales del siglo XII principios del XIII, cuando todavía el campo de la acústica era empírico y se basaba en los conocimientos antiguos y la experiencia. Además, no es una iglesia con planta rectangular, de naves, sino que se trata de una iglesia de planta mixta, simbiosis de planta circular y longitudinal (Bednorz, 1996). El desconocimiento del comportamiento acústico de recintos con esta morfología hace especialmente atractivo este trabajo.

1.1 Objetivos

Dos son los objetivos que se buscan, ambos con el mismo peso. El primero de ellos es aprender a realizar un modelado acústico de un recinto. En este caso se ha tenido la posibilidad de realizar mediciones *in situ* que permitirán realizar un modelo ajustado a la realidad y obtener resultados precisos y reales. Aumentar el conocimiento de este proceso, tanto en la realización de mediciones como en el manejo del programa informático, del que no se tenía ningún conocimiento previo al máster, es el objetivo académico, digamos, de este trabajo. En este aspecto, la ayuda ofrecida para la toma de contacto con el programa informático tanto por el tutor como por otros profesores y algún compañero ha sido muy importante. Mientras, el paso previo al programa de acústica es el modelado del recinto, y ya que se tiene gran conocimiento previo en el modelado digital en 3D, se aprovecha esta experiencia para analizar un espacio geoméricamente complejo.

Mientras que el segundo objetivo es quizás más personal. Se trata de comprender desde el punto de vista acústico la compleja geometría de la iglesia de la Vera Cruz. Partiendo de un análisis del contexto histórico de la iglesia, de antecedentes con los que guarda similitudes geométricas y teniendo en cuenta los ritos y celebraciones para los que fue construida, se pretende obtener conclusiones que lleven a pensar que esta geometría tiene un marcado carácter acústico. Dado el amplio abanico de posibilidades que ofrece el programa informático empleado, se pretenderá mostrar los parámetros y resultados que resulten más concluyentes a la hora de obtener las conclusiones.

Es decir, se busca exprimir al máximo las herramientas con las que se cuenta en la actualidad para dar sentido acústico a un recinto construido basándose en conocimientos muy básicos pero que se sabía por experiencia que funcionaba para la finalidad buscada. Además, este campo de la acústica abarca varios de los temas tratados en el máster.

1.2 Motivación sobre el tema

Durante el máster se ha tratado un amplio abanico de temas tanto en el campo de la acústica como de las vibraciones muy interesantes y que pueden ser de aplicación en diferentes disciplinas. Algunos de los temas se han tratado con mayor profundidad que otros, siendo el de la simulación acústica de un recinto uno de los que se ha tratado con mayor superficialidad. Sin embargo, la acústica geométrica se ha tratado con gran profundidad, además de con gran interés y disfrute personal. Por ello, se busca completar el conocimiento de estos conceptos básicos que pueden ayudar a comprender rápidamente una sala con el conocimiento que aporta la acústica estadística y las casi infinitas posibilidades de los programas informáticos.

La formación previa en arquitectura que se ha tenido, salvo muy superficialmente la acústica geométrica y el aislamiento y la absorción acústica, no había aportado conocimientos en este campo de la acústica. Por esto se busca aumentar el conocimiento en la acústica de recintos, saber calcular los parámetros que definen el sonido en un punto en concreto y conocer el comportamiento de la energía sonora en un espacio.

Puesto que se sabía que este trabajo requería la modelización tridimensional del recinto, campo muy trabajado y conocido previamente, se busca un recinto interesante y complejo geométricamente, para que el trabajo no solo sirva para aumentar los conocimientos en el campo de la acústica, sino que se puedan aplicar conocimientos previos para llegar a un resultado más interesante. Además, en este caso no se conocen *a priori* los ritos que se celebraban en la iglesia, aunque si se intuye que no serán ritos comunes, por lo que el esquema emisor-receptores no se reproduciría en este caso, siendo posible que los receptores fueran a su vez emisores.

1.3 Motivación sobre el recinto

Inicialmente se plantearon varios recintos para analizar, como son la Sala Triste del Palacio de Santa Cruz o la capilla del Museo Nacional de Escultura, ambos en Valladolid. Finalmente se escogió la iglesia de la Vera Cruz en Segovia. Varios motivos han llevado a escoger este templo. El principal motivo es el conocimiento de la iglesia y de su singularidad arquitectónica. Puesto que en la asignatura de Acondicionamiento Acústico se ha estudiado la acústica de recintos cuadrados, rectangulares o trapezoidales, se buscó un recinto geoméricamente más complejo para realizar un estudio profundo.

Los recintos planteados eran salas rectangulares, y no se encontraba gran atractivo en ellos. Sin embargo, la configuración de esta iglesia es completamente distinta a cualquier otra iglesia de la ciudad, incluso de la provincia. La planta de la iglesia es un dodecágono con un edículo central, formado por dos volúmenes superpuestos, a esta configuración se le denomina "iglesia-rotonda", y tres ábsides paralelos adosados en el lateral este del dodecágono. Así pues, tendría una estructura mixta, radial o circular por el dodecágono que forma la planta, y longitudinal, por los ábsides, en sentido este-oeste. Estas características la hacen una iglesia excepcional.

Una geometría tan singular conduce a otro motivo de interés acústicamente hablando: ¿qué tipo de ritos se realizaban en su interior? ¿Eran ritos cantados en los que todos los asistentes participaban por igual o, por el contrario, eran ritos litúrgicos en los que había una persona que se dirigía a los asistentes? La iglesia tiene la cruz de Malta por sus muros y es conocida como la iglesia de los Templarios pero, ¿es esto cierto? ¿Realmente fue construida por los caballeros Templarios o fueron los Caballeros del Santo Sepulcro?

La diferencia entre una y otra puede llegar a ser relevante ante los posiblemente diferentes ritos y celebraciones de cada una de las órdenes. Además, sea cual fuere la orden que la construyó, ambas tienen en torno a ellas un aura de intriga, de misterio, que hace que el interés y el ansia por descubrir sus misterios y aumentar el conocimiento por este templo se incremente.

Para mayor misterio aún del templo, una leyenda segoviana dice que durante la vela del cuerpo de un caballero de la orden, los demás hermanos dejaron el cuerpo solo en un descuido y el cuerpo del caballero fue atacado por los grajos (ave muy común en Segovia). El prior maldijo las aves impidiéndoles entrar o acercarse a la iglesia y, desde entonces, nadie ha vuelto a ver grajos en la Vera Cruz (García Atienza, 1995).

2 LA IGLESIA DE LA VERA CRUZ: LA IGLESIA DE LOS TEMPLARIOS

Inicialmente se va a realizar una descripción de la iglesia de la Vera Cruz en todos sus aspectos, desde su ubicación en el conjunto de la ciudad de Segovia hasta su geometría. Además se realizará una contextualización histórica y se descubrirá si su apodo de “templaria” es correcto. También se mostrarán unos ejemplos de edificios similares distribuidos por Europa.



Ilustración 2-1. Vista exterior de la iglesia. Fotografía propia.

2.1 Localización geográfica

Ya se ha mencionado la singularidad de la iglesia, pues bien, esta comienza en su localización en la ciudad (Ilustración 2-2). Se encuentra en la zona de extramuros de la ciudad de Segovia, podría decirse que se ubica a los pies del Alcázar. Pero resulta extraño ya que no se han encontrado motivos que justifiquen este emplazamiento. Se erige en una pequeña explanada pedregosa, aislada en el inhóspito paisaje de esa zona donde no se tiene constancia de edificación cercana en los tiempos en que se construyó la iglesia, junto a la carretera que une los barrios de San Marcos y de Zamarramala.

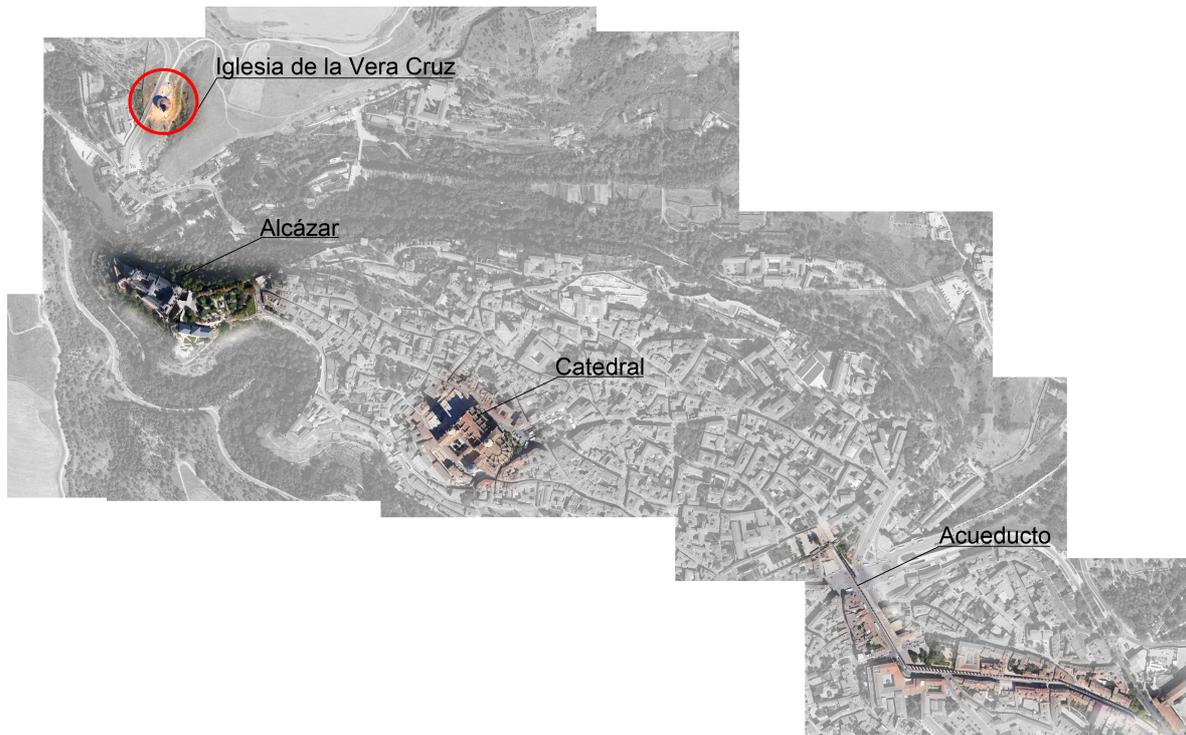


Ilustración 2-2. Localización geográfica de la iglesia de la Vera Cruz y los principales monumentos de Segovia.

Fuente: Elaboración propia a partir de capturas de Google Earth.

2.2 Contexto e historia

En cuanto a su origen, su contexto histórico, José Manuel Merino de Cáceres, en la monografía *La iglesia de la Vera-Cruz de Segovia, conocida como de los templarios*, editada por la Academia de Historia y Arte de San Quirce, dice que el primer escrito que se tiene sobre esta iglesia es del cronista segoviano Diego de Colmenares, que en el CAPÍTULO XIX, título IV de su *Historia de Segovia*, dice:

Los templarios [...], habiendo sido su primer instituto asegurar de salteadores los caminos de tierra santa, y creciendo adelante en gente y fuerzas, guerrear a los enemigos de la fé cristiana; fundaron en España muchos templos y conventos, y en nuestra ciudad uno, con título de la Vera Cruz, por una preciosa reliquia que en él colocaron de la verdadera Cruz en que murió Jesucristo. Su fábrica es al modelo mismo del templo del sepulcro santo de Jerusalén, que fue su primitiva vivienda, y causa de nombrarse templarios. La fundación o consagración fue año mil y doscientos y cuatro en trece de abril, como permanece sobre la puerta de medio dia de las cuatro en que está fundada la fábrica interior del sepulcro y dice:

*HAEC SACRA FUNDANTES COELESTI SEDE LOCENTUR: ATQUE
SUBERRANTES IN AEDEN CONSOCIENTUR. DEDICATIO ECCLESIAE
BEATI SERVI CHRISTI: IDUS APRILIS, ERA M.CC.XL.II. (Ilustración 2-3)*

Pero según varios autores, esta transcripción no es del todo correcta y cada uno da una propia. Merino de Cáceres aporta una transcripción propia, que coincide con la que realiza el conde de Cedillo en el informe que hizo cuando se le dio carácter de Monumento nacional:

*HEC: SACRA: FVNDANTES: COELESTI: SEDE: LOCENTUR: ATQVE:
SVBERRANTES: IN EADEM: CONSOCIENTUR: DEDICATIO: ECCLIE:
BEATI: SEPULCRI: IDVS: APRILIS: ERA: M:CC:XL:VI:*

La traducción sería:

*LOS FUNDADORES DE ESTE LUGAR SAGRADO SEAN LLEVADOS
A LA MANSIÓN CELESTIAL Y SUS SUCESORES PUESTOS EN LA MISMA
CON ELLOS. DEDICACIÓN DE LA IGLESIA DEL SANTO SEPULCRO EL
DÍA 13 DE ABRIL. ERA DE 1246.*

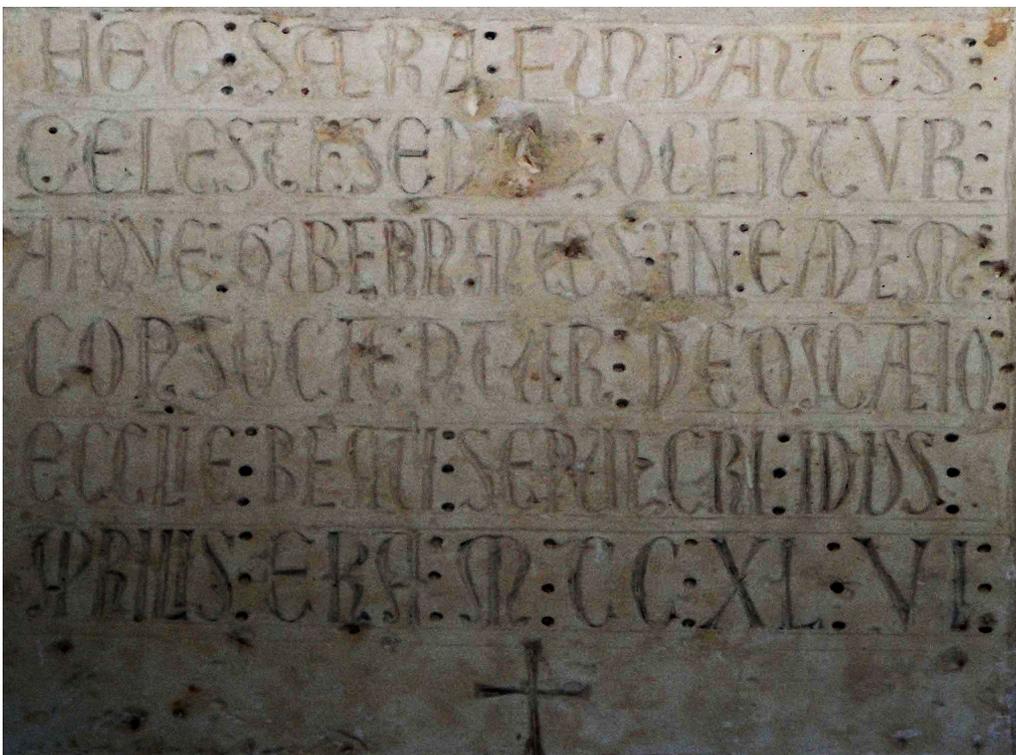


Ilustración 2-3. Losa con la inscripción de la consagración de la iglesia. Fotografía propia.

La Orden del Santo Sepulcro actual aporta otra interpretación y traducción, similar a la de Merino de Cáceres y el conde de Cedillo:

*HAEC: SACRA: FUNDANTES: CELESTE: SEDE: LOCENTUR ATQUE:
SUBERRANTES: IN: EADEM: CONSOCIATUR: DEDICATIO: ECCLIE:
BEATI: SEPULCRI: IDUS: APRILIS: ERA: M:CC:XL:VI:*

Y su traducción:

*LOS FUNDADORES DE ESTE TEMPLO SEAN COLOCADOS EN LA SEDE
CELESTIAL, Y LOS QUE SE EXTRAVIARON LES ACOMPAÑEN EN LA
MISMA. DEDICACIÓN DE LA IGLESIA DEL SANTO SEPULCRO. EN LOS
IDUS DE ABRIL, ERA DE 1246.*

El año que aparece en la inscripción, 1246, se refiere a la Era Hispánica y se corresponde con el año 1208 de la actual Era Cristiana. No fue hasta el 13 de mayo de 1224 cuando Honorio III les envió *a los caballeros del Templo y a la Iglesia del Santo Sepulcro*, un breve junto con la reliquia del *Lignum Crucis* (García Atienza, 1995; De Lojendio y Rodríguez, 1985) que menciona Colmenares y que daría nombre al templo. Sin embargo, no se tiene certeza de si se construyó la iglesia para tal fin. De cualquier modo, Merino de Cáceres pone en duda esta lápida puesto que, primeramente, la piedra de la lápida parece ser de las canteras de Bernuy o de Valseca, no de Zamarramala, como sí lo es la totalidad de la fábrica de la iglesia; y por otra parte, su ubicación, ya que no está empotrada en un muro como suele ser, sino que está acoplada en el hueco de una ventana ciega. Estos dos aspectos le hacen pensar que esta lápida ha sido trasladada desde otro lugar o incluso desde otro edificio.

Volviendo a los autores de la iglesia, hay motivos para adjudicar la autoría tanto a los Templarios como al Santo Sepulcro. Por un lado, puede atribuirse a los Templarios por las semejanzas entre esta iglesia y la iglesia de Tomar, en Portugal, de la cual se tiene certeza de su origen templario. También apoyaría esta teoría las semejanzas con la mezquita de Omar, en Jerusalén, de la que se conoce que desde principios del siglo XII perteneció a la por entonces naciente orden de los Caballeros del Templo.

Por el contrario, de la inscripción de la lápida anteriormente citada puede extraerse que fueran los Caballeros del Santo Sepulcro los autores: *DEDICATIO ECCLIE BEATI SEPULCRI*. Además, en el espacio superior del edículo central hay un bloque de piedra en forma de altar, que se ha supuesto que representaba el Santo Sepulcro. De hecho, en algún momento, posteriormente, ha servido para sostener una urna con la representación

de Cristo yacente. El hecho de que la basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén tenga la misma configuración circular y que por toda la Europa medieval los Caballeros del Santo Sepulcro construyeran iglesias semejantes a la iglesia de la Vera Cruz aporta cierta veracidad a esta segunda teoría.

De todos modos, esta ‘polémica’ sobre la autoría de numerosos templos viene de lejos. Colmenares en *Historia de Segovia* indica:

Cuantas ruinas de templos grandes que se ven sin averiguación de lo que verdaderamente fueron, atribuye el vulgo a los Templarios.

Así pues, la mayoría de los historiadores atribuyen a los Templarios la construcción de la iglesia. El Marqués de Lozoya planteó la posibilidad de que fueran los Templarios los que iniciaran la construcción y, por motivos desconocidos, pasase a los Caballeros del Santo Sepulcro, consagrándolo tardíamente en 1208 (De Lojendio y Rodríguez, 1985).

A este debate pone fin la Orden del Santo Sepulcro, afirmando que fue la propia Orden quien inició la construcción del templo a inicios del siglo XIII. También mencionan las creencias populares que atribuyen la creación a los Templarios, por su semejanza con la iglesia de Tomar y por el texto del papa Honorio III entendiendo, pues, la confusión. Por lo tanto, la segunda de las teorías es la cierta y la creencia popular más extendida es errónea, fue la Orden del Santo Sepulcro quien construyó la iglesia, dependiendo en el momento de su construcción de la Bailía de Toro, Zamora. Es más, el historiador de la orden templaria en España, Gonzalo Martínez Díez, S. I., deshecha por completo su atribución a los Templarios ya que no tendría valor histórico. La documentación que posee la Orden del Santo Sepulcro afirma que las visitas canónicas durante la construcción de la misma se realizaron desde Toro y por parte del Santo Sepulcro, no del Temple, siendo en 1528 la última visita de los caballeros sepulcristas y en 1532 la primera de los caballeros hospitalarios (Gómez García, Ed, 2013).

Este cambio de Orden lo menciona Colmenares, pero argumentando la disolución del Temple. Sin embargo, Santos San Cristóbal, apoyado en los documentos de la Orden de Malta, (Gómez García, Ed, 2013), afirma que en 1522 la Encomienda de la Vera Cruz de Segovia pertenecía a la Orden del Santo Sepulcro, *siendo Parte y Miembro unido a la Encomienda del Santo Sepulcro de Toro*. También indica que el 23 de septiembre de 1531, que figura también en otra piedra situada en la ventana este de la estancia superior del edículo central (Ilustración 2-4), la iglesia de la Vera Cruz pasa a depender de la Orden y Religión de San Juan de Rodas, según la determinación tomada en Toro el 4 de septiembre, cuando a esta orden se incorporaron *todas las iglesias, Casas y Hospitales y Combentos que havian sido de la Orden del Santo Sepulcro de Jerusalén*.

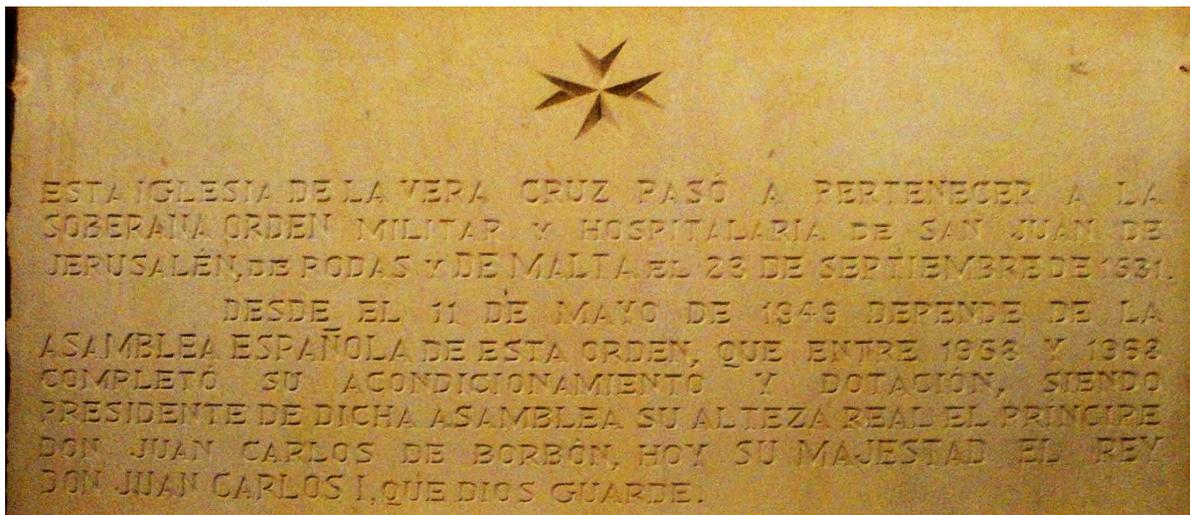


Ilustración 2-4. Inscripción en la que se indica el cambio de pertenencia de la iglesia. Fotografía propia.

Gabriel M. Vergara, anotador de la obra de Diego de Colmenares, afirma que en tiempos del cronista el *templo y priorato* de la Vera Cruz formaba parte de la Encomienda de Miraflores de la *Religión de San Juan*. Bajo esta orden, en la Vera Cruz se mantuvo el culto a la iglesia, siendo además parroquia del arrabal de Zamarramala hasta finales del siglo XVII.

Según un documento que se encuentra en la actual parroquia de Zamarramala, el 24 de octubre de 1692 cuando, por licencia concedida por la Sacra Asamblea de San Juan de Jerusalén, la iglesia de la Vera Cruz dejó de estar dedicada al culto parroquial, el cual se trasladó a la iglesia parroquial de Santa Magdalena. Los sanjuanistas autorizaban, en el mismo escrito, el traslado de ornamentos, alhajas y campanas de la Vera Cruz a la nueva parroquia. Además se permitía el traslado de la Santa Reliquia del Madero y del Santísimo Cristo del Sepulcro. Así pues, la iglesia quedaba *en el estado de Ermita y el dominio y propiedad de ella por la iglesia regular y convento de dicha Sacra Religión y su Encomienda*. Al mismo tiempo los vecinos construirían una pequeña casa que sería la vivienda de un Santero que se encargaría de la limpieza de la Ermita.

La iglesia seguía en manos de los sanjuanistas, hasta que el 14 de octubre de 1835 la *Gaceta de Madrid* publicaba el Real Decreto, firmado en el Pardo el 11 de octubre, por el que se establecía la supresión de *todos los monasterios de órdenes monacales*, declarándose así estos bienes de propiedad nacional. De este modo, el templo quedó abandonado y pasó a convertirse, según la tradición popular, en *refugio de pobres y arrieros que no tuvieron reparo en establecer en ella chimeneas para sus fuegos y establos para sus animales*.

Sin embargo, esto no parece que fuera cierto, al menos en su totalidad, puesto que José María de Avrial, que denunció barbaridades parecidas en otros monumentos, no lo

menciona. Avrial, en su estancia en Segovia entre 1837 y 1840, realizó cinco láminas de diferentes aspectos del templo en los que se aprecia un buen estado de conservación a pesar del prolongado abandono.

En 1844 se creó la Comisión Provincial de Monumentos de Segovia y una de sus primeras acciones fue la custodia de la Vera Cruz, aunque sería el Ayuntamiento de Segovia quien se encargaría de su mantenimiento por falta de recursos económicos.

El 4 de junio de 1919, por Real Orden, la Vera Cruz es declarada Monumento nacional. En los informes realizados a tal caso, previos a su declaración como Monumento nacional, por el conde de Cedillo (Anexo I, Informe del Conde de Cedillo), por parte de la Academia de Historia, y don Ricardo Velázquez Bosco, por parte de la Real de San Fernando, ambos aceptaron la teoría más extendida y atribuyeron la construcción de la iglesia a los caballeros Templarios.

Por Orden Ministerial, el 11 de mayo de 1949, el Ministerio de Educación Nacional cede el uso de la iglesia para la celebración del culto católico a la Soberana Orden Hospitalaria y Militar de Malta, como heredera de los hospitalarios de San Juan de Jerusalén. La cesión se firmó el 1 de junio de 1950 y la toma de posesión se llevó a cabo el 31 de mayo de 1951.

Desde entonces la iglesia está en manos de la Soberana Orden Militar y Hospitalaria de San Juan de Jerusalén, de Rodas y de Malta, quienes celebraban frecuentemente capítulos de la Orden.

Actualmente es un museo abierto al público y esporádicamente se celebra culto, aunque el Viernes Santo, en recuerdo de la pasión y muerte de Cristo, se realiza oficio litúrgico además de la procesión y traslado del Cristo Yacente y el *Lignum Crucis* desde la iglesia de Zamarramala, en la que participan los caballeros custodios ataviados con sus hábitos. Además, el templo es sede del capítulo anual de San Juan de la Orden de Malta en España. Los caballeros abren capítulo desde el cercano convento de los Padres Carmelitas y procesionan hasta la iglesia de la Vera Cruz, donde pasan por el edículo central y ocupan los bancos a los lados del deambulatorio y del ábside principal (Exposición, 2015).

2.3 El Temple

A mediados del siglo XIX, Mérimée, Lenoir y Viollet-le-Duc, tres de los historiadores más influyentes de la época, configuran la idea, posiblemente basándose en supuestos tradicionales, de que los Templarios construían sus iglesias con plantas circulares o poligonales a imitación del Santo Sepulcro o del 'Templo de Jerusalén'. Esto se produce en el momento en que el estudio de la historia de la Arquitectura pasaba de basarse en la

aceptación de tradiciones orales y de cualquier documento escrito, ya fuera verdadero o una falsificación, a basarse en un estudio de los documentos existentes y en la investigación histórica.

Así pues, dado que los tres historiadores mencionados eran conocidos y prestigiosos, la teoría fue aceptada y ninguno de los historiadores que comenzaba a realizar un estudio de la historia documentado y con gran investigación la contradijo. De esta forma, durante este siglo se fue creando una oscurecida y atrayente leyenda, en parte ya creada en épocas anteriores, que durante el siglo XX mantuvo el interés que hoy en día aún perdura.

El primero en escribir sobre ello fue Prosper Mérimée, que era Inspector de Monumentos Históricos de Francia, en 1836, quien describió la iglesia-rotonda de Lanleff, en la Bretaña:

En otros tiempos, dicen las gentes del país, había monjes rojos (Menec'hedruz). Era así como llamaban antiguamente a los templarios, que llevaban una cruz roja en sus capas. Se sabe que, a menudo, daban a sus iglesias la forma redonda, en recuerdo a la del Templo de Jerusalén, a cuya defensa consagraron.

Pocos años después, en 1852, Albert Lenoir, arqueólogo francés, publicaba la primera parte de *Architecture monastique*, en la que expone:

Una orden célebre, la de los templarios, contribuyó también a reproducir en occidente, hasta el siglo XIII, las formas de los primeros edificios cristianos del imperio griego: guardianes del Santo Sepulcro y protectores de los numerosos peregrinos que visitaban Tierra Santa, imitaron sus iglesias, generalmente con proporciones restringidas, la configuración del monumento de Jerusalén que había sido la base de la institución. La mayor parte de sus capillas eran circulares y en su difusión por Francia, Alemania, Inglaterra y España, contribuyeron a mantener los últimos vestigios de la arquitectura bizantina. Las iglesias del Temple en Londres, París y Alemania eran redondas.

Se ven también algunas que fueron construidas sobre planta poligonal: como las de Segovia, Montmorillón, Laon, Metz (Ilustración 2-5).

Esta última forma (Ilustración 2-5, París) confirma la intención que tenían los caballeros del Temple de recordar uno de los edificios importantes de la cristiandad oriental.

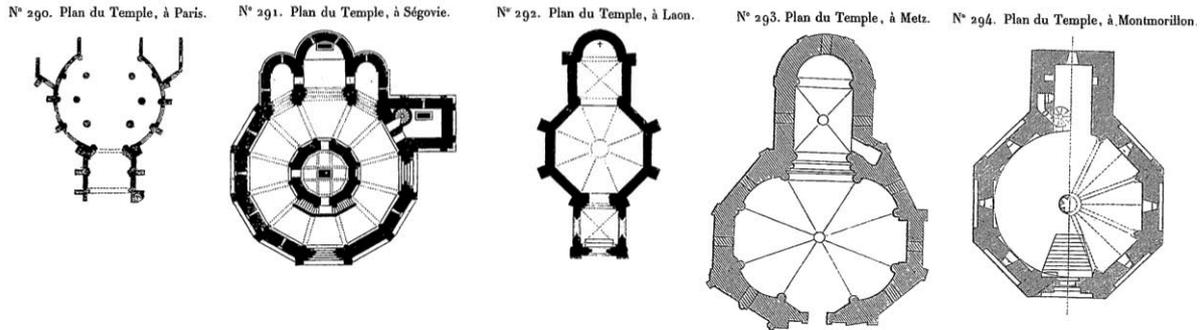


Ilustración 2-5. Plantas de iglesias de “el Temple” de París, Segovia, Laon, Metz y Monmorillon.

Fuente: Lenoir, 1852.

Por último, Viollet-le-Duc crea teorías arquitectónicas alrededor de El Temple, en su gran obra *Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française*. Cuando le-Duc trata sobre la palabra ‘sepúlcro’ <*sépulcre (saint)*> dice:

Los edificios circulares, conocidos bajo el nombre de capillas de los templarios, como los que existen en algunos puntos de Francia, en Metz y Loan principalmente, son reminiscencias del Santo Sepulcro. Pero la orden de los templarios, especialmente dedicada a la defensa y conservación de los Santos Lugares, elevaba en cada encomienda una capilla que debía ser la representación de la rotonda de Jerusalén. El Temple de París, poseía su capilla circular.

Mientras, al tratar la palabra ‘templo’ <*temple*> dice:

Durante la Edad Media se daba el nombre de templos a las capillas de las encomiendas de los templarios; estas capillas estaban habitualmente construidas sobre planta circular, en recuerdo del Santo Sepulcro, siendo bastante exiguas. Bien entendido, las capillas templarias más antiguas no se remontan sino hacia mediados del siglo XII, y casi todas fueron construidas en esta época.

En este mismo apartado, después de haber hecho una breve descripción de la iglesia del Temple de París, continua:

El triángulo equilátero había sido el generador del plano de la rotonda. Se sabe que el triángulo equilátero era uno de los signos adoptados por los templarios. [...] No hay que olvidar que los fundadores de la orden del Temple eran nueve (cuadrado de tres), que no les fue permitido ordenar nuevos hermanos hasta pasados nueve años, y que los números tres y nueve se encuentran frecuentemente en las capillas de las encomiendas. La gran rotonda de París poseía al interior seis pilares, y al exterior doce pilastras. Su trazado no habría podido ser obtenido, más que con dos triángulos equiláteros.

A pesar de que esta teoría se hizo fuerte, hoy en día puede afirmarse sin lugar a dudas que, ni todas las iglesias de planta central fueron construidas por los Templarios, ni todas las fundaciones templarias seguían un esquema centralizado en sus templos. Por otro lado, igual de cuestionable es el hecho de que fuera la iglesia del Santo Sepulcro de Jerusalén el modelo para las iglesias templarias de planta centralizada, este aspecto Mérimée no lo comparte, por lo que estaría acertado, al contrario que los otros dos autores.

Por ejemplo, la iglesia-rotonda de la *Maison-Dieu* en Montmarillón sí que parece haber sido obra de los Hospitalarios de San Juan de Jerusalén, hacia 1107; igual que la iglesia de San Benigno de Dijón, del año 1001, y la iglesia de Charroux en Poitou, inspiradas al parecer en el Santo Sepulcro, pero sin ser obra de los Templarios, igual que la iglesia de la Vera Cruz, como ya se ha visto. Del mismo modo que hay varios ejemplos de iglesias que sí que fueron construidas por El Temple pero que no tienen el esquema de planta centralizada, como son los templos de Safita, Tortosa, Villamuriel de Cerratos o Ceinos de Campos.

Por otro lado, también es dudosa o necesita matización la afirmación de que la iglesia del Santo Sepulcro fuera fuente de inspiración para las construcciones templarias, o de la Orden del Santo Sepulcro, de planta circular o poligonal. Cuando Lenoir afirma que eran los Templarios los que custodiaban el Santo Sepulcro está equivocado, puesto que fueron los caballeros del Santo Sepulcro. Esta Orden fue instituida por Godofredo de Bouillón en Jerusalén en 1099, y se encargaban de proteger la tumba de Jesucristo y orar sobre ella. Mientras que el origen de los Templarios data de 1118 y fue instituida por Hugues de Payns y Gaufrédo de San Ademaro, y su denominación inicial fue 'pobres caballeros de Cristo'.

2.3.1 Los ritos de la Orden

Antes de comentar los ritos que tenían los caballeros, cabe destacar que la Orden estaba jerarquizada y había diferentes niveles de pertenencia a la misma, habiendo hombres de guerra (caballeros, sargentos, mariscales, comandantes), hombres de la fe (capellanes) y hombres de labores (criados, artesanos, drapeir, que era el encargado del vestuario). Además de los afiliados, que eran caballeros casados, aceptados en la Orden pero que no podían vivir en las casas comunes. La Orden contaba con oficio, sacerdocio y sacramento. Para pertenecer a la Orden se tenía que estar ligado a dicho oficio religioso y ligado a Dios por el mismo. En el oficio se resumen todos los elementos de la doctrina en materia de fe.

El oficio recuerda al católico, al protestante, al ortodoxo y al musulmán, adoptando las bases de una piedad y fe comunes para un retorno a las fuentes de la verdadera religión. Los caballeros expresaban su fe en dos planos de la vida sacramental. La exterior, exotéricamente, la Orden tiene como rito sacerdotal la misa eucarística, presidida por un sacerdote católico y célibe. La interior, esotéricamente, la orden está unida al rito esenio. Este rito está presidido por un oficiante de la Orden, laico, que es escogido entre los caballeros y, generalmente, estaba casado.

Este rito esenio se basaba en la ofrenda a Dios de los productos de la tierra por la pareja sacerdotal que constituían el oficiante y su esposa. Este aspecto era muy importante en el rito, ya que el respeto a esta complementariedad de hombre y mujer daba testimonio de un rescate de la humanidad. Además, si un oficiante no estaba casado o su mujer estaba ausente, este debía pedir ayuda a uno de sus hermanos, no podía ayudarle una mujer, porque alteraría la significación de la pareja sacerdotal, que suponía el restablecimiento de Adán y Eva en su dignidad antes de la salida del Paraíso. En la comunión no se encuentran referencias a sacrificios.

El oficio eucarístico, que a menudo era concelebrado por sacerdotes y oficiantes, no era una imitación ni reemplazo de la misa, puesto que al tomar el pan mojado en el vino lo que se realizaba era una exaltación del Cristo Resucitado, no del Cristo doloroso y crucificado que el sacerdote 'sacrifica' en la misa eucarística.

Además de las celebraciones eucarísticas, los miembros de la orden realizaban diversos rezos a lo largo del día a las horas canónicas. A su vez, estas oraciones estaban divididas en Horas Mayores y Horas Menores, aunque también hay otras divisiones dependiendo de si se realizaban por el día o por la noche.

En las Horas Mayores era obligatorio que toda la comunidad se reuniera en la iglesia para realizar las oraciones. Estas son:

- Maitines: se rezaban a partir de medianoche.
- Laudes: llamados así por la repetición en los Salmos del imperativo *latina láudate*. Se rezaban al amanecer.
- Vísperas: al final de la jornada, tras la puesta del sol, sobre las 18:00.

Las Horas Menores se realizaban en el puesto de trabajo o en la celda, y se hacían inmediatamente después de escuchar la campana, deteniendo las labores que se estuvieran realizando. Estas son:

- Prima: hora en la que sale el sol, sobre las 6:00 de la mañana. Está marcada por un toque de campana que indica el inicio de la jornada.
- Tercia: tercera hora después de salir el sol, alrededor de las 9:00.
- Sexta: al mediodía, a las 12:00.
- Nona: sobre las 15:00, Hora de la Misericordia.
- Completas: antes del descanso nocturno, alrededor las 21:00, donde el monje pedía perdón por sus pecados y oraba para conjurar los peligros de la noche.

Por otra parte, la ceremonia de recepción de un nuevo caballero se basaba en un diálogo entre el Maestro y el aspirante a caballero, en presencia del Capítulo, que era un Consejo compuesto por el Maestro y los hermanos de mayor experiencia que tomaba cualquier decisión importante, desde la recepción de nuevos caballeros hasta la declaración de la guerra o la firma de armisticios.

Como todo lo que rodea a esta Orden, su fe y sus creencias también tiene a su alrededor un aura de misterio y de duda. Durante el proceso que se realizó contra la Orden, se enunciaron más de 100 acusaciones, entre otras cosas de prestar culto a Baphomet, además de rituales de renegación de la cruz o de Cristo. Además de la adoración a un gato que se les aparecía en las asambleas; tener diferentes ídolos en cada provincia, que podían ser de tres cabezas, una, incluso calaveras humanas, que veneraban durante los grandes capítulos y asambleas como a Dios, como a El Salvador, quien les hacía ricos, quien hacía que florecieran los árboles y que la tierra germinase. Este supuesto de la adoración de ídolos puede fundamentarse en la aparición de calaveras y figuras como las que existen de varias cabezas en algunos de los templos. No han sido demostradas, pero aumentan el carácter misterioso de la Orden.

Es decir, tenían celebraciones en las que sí que se daba el esquema emisor-receptor, con uno o varios emisores, y otras en las que todos los caballeros oraban a la vez siendo emisores y receptores simultáneamente.

2.3.2 El Canto gregoriano

Los ritos se realizaban entonando el llamado canto gregoriano. Este canto es un tipo de canto llano, es decir, simple, monódico y con el ritmo sometido al texto. Se empleaba, y sigue empleándose en la liturgia de la Iglesia Católica Romana, aunque también se utiliza el término como sinónimo de canto llano.

2.3.2.1 Características

- Las partituras están escritas en tetragrama (no pentagrama como actualmente).
- Se considera ritmo libre, puesto que está sometido al texto latino.
- Son plegarias cantadas.
- Es canto monódico (una única melodía) y *a capella* (sin acompañamiento instrumental) interpretado por voces masculinas. Se interpretan de forma coral (bien la asamblea completa, o la *schola cantorum*), o de manera solista (el celebrante o uno de los cantores de la *schola cantorum*).
- El texto es en latín, salvo el *Kyrie Eleison* (“Señor ten piedad”) escrito en griego.
- Todas las piezas son modales, escritas dentro de uno de los ocho modos gregorianos o eclesiásticos: *protus*, *deuterus*, *tritus* y *tetrardus*, cada uno en sus dos posibles versiones, auténtica o plagal.
- La forma musical está definida por la del texto y por el contexto litúrgico.
- La línea melódica se mueve por grados conjuntos, siendo raros los grandes intervalos en la voz. Se mueve por segundas, terceras, cuartas o quintas.
- El repertorio es anónimo.
- Se clasifican según diferentes criterios:
 - Según la forma de interpretarse:
 - Estilo responsorial: alternancia de un solista con un coro.
 - Estilo antifonal: alternancia de dos coros.
 - Estilo directo: un solo coro o solista.
 - Según el tipo de texto:
 - Bíblicos: aparecen en la Biblia.
 - No bíblicos: no aparecen en la Biblia.
 - Según el número de notas cantadas por sílaba:
 - Silábico: una nota por cada sílaba.
 - Neumático o adornado: dos o tres notas por sílaba.
 - Florido o melismático: con más de tres notas por sílaba.

2.3.2.2 Formas

El canto gregoriano tiene diferentes expresiones. Las principales son el recitativo litúrgico, la Salmodia, la Santa Misa y el Oficio divino. Los textos conocidos como *accentus* los entonan los obispos, sacerdotes o diáconos en una sola nota con melodías muy simples en algunos tramos. Los cantos más complejos son cantados por coros o solistas expertos. Existen muchas colecciones de cantos litúrgicos que incluyen *Graduale Romanun* (o *Graduale Triplex*, mismo contenido con triple notación), que abarca Cantos del Propio y Canto del Ordinario de la Misa; y *Liber usualis*, incluyendo Cantos de la *forma extraordinaria de la Misa* (Misa Tridentina) y Cantos del Oficio Divino.

- Cantos del Propio de la Misa (*Propium Missae*): constituidos por piezas que se cantaban según el tiempo litúrgico o la fiesta celebrada. Las letras cambiaban cada domingo. Son: introito (entrada); gradual, aleluya o tracto; secuencias; ofertorio; comunión. Además hay otras piezas cantadas recitándolas con algunas inflexiones (*cantillatio*): oraciones, lecturas, prefacio y el Padrenuestro. Eran más sencillas y podían ser ejecutadas sin tener grandes habilidades para el canto.
- Cantos del Ordinario de la Misa: está compuesto por los textos que se repiten en todas las misas, manteniéndose invariables, siempre en latín (salvo el *Kyrie*). Son el *Kyrie*, frecuentemente en un estilo melismático; el *Gloria*, el texto es alternado entre dos o más partes del coro o entre el coro y la congregación; *Credo*, monofónico cantado por un solista y un coro sin acompañamiento musical; *Sanctus* y *Benedictus*; *Agnus Dei*; *Ite, missa est*.
- Cantos del Oficio Divino: conocido como Liturgia de las Horas, se realizan en las horas canónicas (Maitines, Laudes, Prima, Tercia, Sexta, Nona, Vísperas, Completas, por orden cronológico a lo largo del día). Son oraciones cantadas durante un largo periodo de tiempo. Hay cuatro canciones: *Alma Redemptoris Mater*, *Alma Regina caelorum*, *Regina caeli laetare*, *Salve Regina*. El repertorio de los Cantos del Oficio Divino está compuesto por el canto de los salmos; simples recitativos (*cantillatio*) de lecturas y oraciones; antífonas de invitatorio; himnos; antífonas cantadas antes y después de los salmos; responsorios; *Te Deum*; Cantos del Antiguo y del Nuevo Testamento (*Benedictus*, *Magnificat*, *Nunc Dimittis*).

2.4 Singularidades de la Vera Cruz

Una vez contextualizada en la historia y atribuyendo, finalmente, su construcción a los Caballeros del Santo Sepulcro, va a describirse un pequeño número de templos de planta centralizada que, en mayor o menor medida tienen similitudes con la iglesia de la Vera Cruz. No son de la misma época, ni son obra de los Templarios, pero dan muestra de que esta construcción no es propia de estos como se tiende a pensar sino, más bien, son construcciones empleadas en templos con intenciones sepulcrales o dedicadas a mártires. Posteriormente se analizará la iglesia a fondo.

2.4.1 Antecedentes: iglesias de planta circular.

Las construcciones de planta circular, centralizadas, comúnmente son edificios dedicados a baptisterios, mausoleos y martirias, en los que la planta se pone al servicio de la necesidad de hacer accesible el objeto o persona venerada. A continuación se van a describir algunos de los edificios de planta circular más destacados. La escala de todas ellas, y la de la Vera Cruz es muy similar, siendo su diámetro de unos 30 metros.

2.4.1.1 Basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén

Ordenada por Constantino en el año 326, concluyó su construcción en el año 335, sobre un templo para el culto a la diosa romana Venus. La tradición dice que al llevar a cabo el derrumbe del mismo, aparecieron tres cruces, una de ellas la Vera Cruz de Cristo.

La construcción original consistía en un cuerpo circular, *Anastasis* (Resurrección), con un deambulatorio de doble altura alrededor del mismo. El anillo superior se abría al cuerpo central a través de un corredor de arcos sobre columnas, al igual que en San Vital de Rávena y en la Capilla palatina de Aquisgrán. A poca distancia, hacia el este, estaba la basílica del *Martyrium*, cinco naves con nártex porticado a los pies de estos, y la cabecera orientada al oeste. En la nave central se situaba una cripta con la 'Capilla de Santa Elena', que fue el lugar en el que tuvo lugar la invención de la Vera Cruz de Cristo, en el año 326. Entre ambos espacios había un segundo atrio porticado con la 'Capilla del Calvario' en su costado sur y conectada con la basílica, sobre el lugar donde tuvo lugar, presuntamente, el martirio de Jesús. Todo ello inscrito en un rectángulo de 155x40 metros.

La construcción original constantiniana es irreconocible actualmente. En los siglos VII y XI tuvieron lugar remodelaciones bizantinas. En el siglo XII, entre 1110 y 1140, los caballeros del Santo Sepulcro realizaron una remodelación completa dentro del estilo románico. Posteriormente, tras un incendio, en 1808 los griegos llevaron a cabo una

desafortunada restauración. Por último, otro incendio en la Guerra Mundial, afectó aun más al templo. Actualmente, de la construcción original solo se conservan algunas columnas aisladas y escasos lienzos de los muros.

Como se ha mencionado, es dudoso que esta basílica sirviera de inspiración para la construcción de templos posteriores por parte de los caballeros Templarios. Sin embargo, sí que se puede realizar una comparación en diversos aspectos entre la iglesia de la Vera Cruz y el estado de la basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén tras la remodelación del siglo XII llevada a cabo por los canónigos de San Agustín y los caballeros sepulcristas. Tras esta, el conjunto de la edificación lo presidía la gran rotunda del Santo Sepulcro, rodeada casi en su totalidad por un deambulatorio –como en la Vera Cruz- con tres ábsides semicirculares en las direcciones norte, sur y oeste. Hacia el este se encontraba la basílica de tres naves, siendo la central más ancha que las otras dos –del mismo modo que ocurre en la Vera Cruz-, y tres ábsides en el lateral este, siendo el central más ancho.

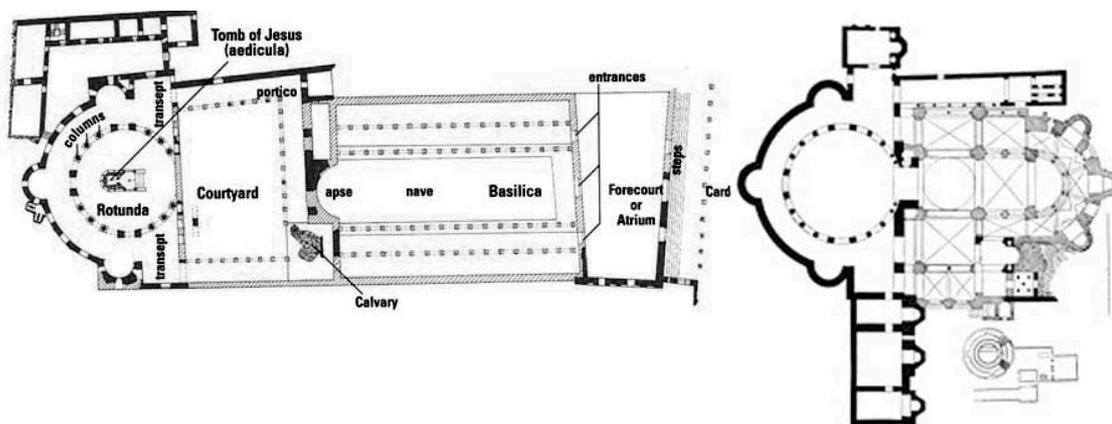


Ilustración 2-6. Plantas de la basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén: Siglo IV, Izquierda; Actual, derecha.

Fuentes: izquierda, circulo-románico.com; derecha, Wikipedia.

2.4.1.2 Iglesia de Santa Constanza, Roma.

Fue mandada construir en el segundo cuarto del siglo IV para albergar los restos de la princesa Constanza. La construcción comenzó en el año 527. Es un edificio de planta centralizada que está constituido por tres círculos concéntricos: el exterior, un peristilo que actualmente no se conserva, delimitado por una columnata al exterior y un muro macizo al interior que es el encargado de soportar la mayor parte del peso del edificio; un segundo espacio delimitado por el muro macizo, aligerado en este lado por nichos cuadrados o semicirculares, y por una doble columnata al interior, cubierta por una bóveda de cañón; y el tercer espacio, circular y cubierto con una cúpula sobre tambor que acoge en el centro un lujoso sarcófago para la princesa. Se accede por un nártex, terminado en dos exedras semicirculares.

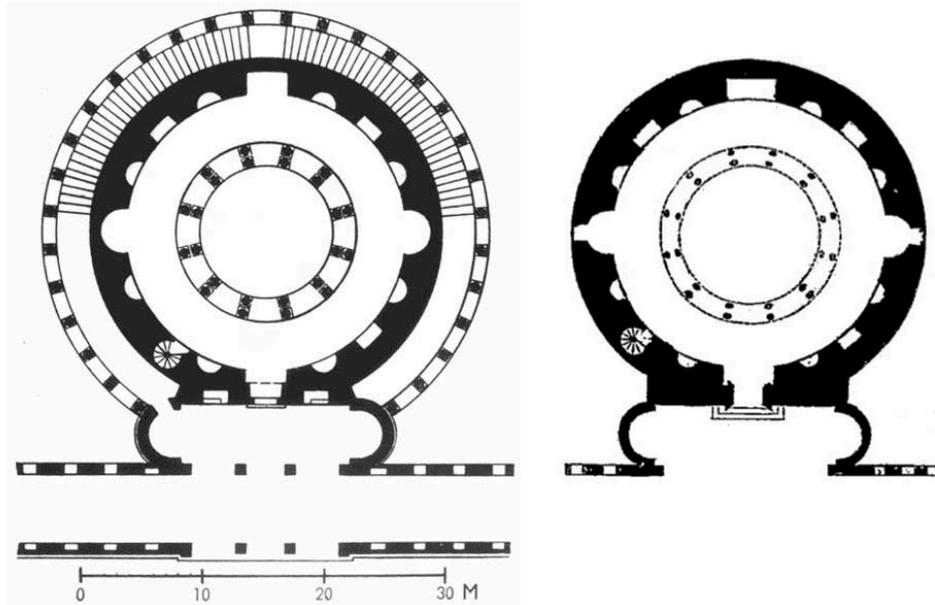


Ilustración 2-7. Plantas de la iglesia de Santa Constanza: original, izquierda y actual, derecha.

Fuentes: understandingrome.files.wordpress.com, izquierda; Lenoir, derecha.

2.4.1.3 Iglesia de San Vital de Rávena.

Encargada por el obispo Ecclesio, fue consagrada en el año 547. Es el espacio más complejo de comprender para el visitante. El acceso se realiza a través de un nártex descentrado, posteriormente se pasa a una sala triangular y, por último, al deambulatorio.

Consta de una sala de oración de planta central con doble anillo octogonal, formado por el deambulatorio, sobre el que se encuentra la tribuna sostenida por las pilastras que delimitan el oratorio circular, rodeado de exedras con miradores hacia el altar mayor. El presbiterio se sitúa al fondo, cubierto por una bóveda de arista y cerrado con una bóveda de horno. A cada lado del presbiterio se encuentran las dos *estancias Phastophorias*, típicas de la arquitectura bizantina: al norte del ábside la *Prótheresis* y al sur el *Diaconicon*.

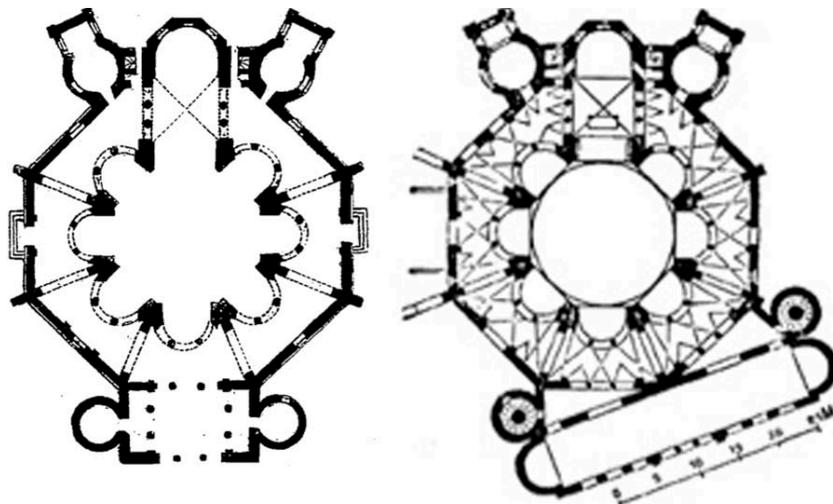


Ilustración 2-8. Plantas de la iglesia de San Vital de Rávena. Fuentes: Lenoir, izquierda; Wikipedia, derecha.

Toda la iglesia respeta los elementos de la tradición eclesiástica antigua, que exigía la separación de sexos durante los actos de culto, además de la posibilidad de la asistencia de alta jerarquía, siguiendo un protocolo estricto que se refleja en los mosaicos. El nártex tiene dos puertas, una para cada sexo. Las mujeres debían entrar por la nave de la epístola, al sur, y si estaban casadas debían asistir a la eucaristía desde la tribuna o *matroneum*, en el piso superior. Los hombres debían entrar por la parte norte o del evangelio y ocupaban la planta principal. En la tribuna hay palcos que se abren directamente al presbiterio reservados a las altas jerarquías. Se supone que la iglesia contaba con un iconostasio, que separaba y ocultaba el altar durante algunas fases de la liturgia en que se exigiera, además de contar con un templete o ciborio sobre el mismo.

2.4.1.4 Capilla Palatina de Aquisgrán.

Inicialmente fue la iglesia privada en el palacio de invierno que el emperador Carlomagno mandó construir a finales del siglo VIII. La construcción se llevó a cabo entre los años 709 y 805, año de consagración de la misma por parte del papa León III. Este edificio está inspirado en la iglesia de San Vital de Rávena que se acaba de describir.

Esta capilla es un edificio de dos plantas coronado por una cúpula. La planta es centralizada, pero en este caso está formada por un octógono circundado por un hexadecágono, entre los cuales discurre el deambulatorio, delimitado por columnas. En el acceso este se encuentra la torre, construida posteriormente –igual que en la Vera Cruz-. En 1414 se le añade a la capilla original un coro gótico, llamado *Aachener Glashauses* (Invernadero de Aquisgrán), sin construir contrafuertes ni arquivoltas, lo que originó diversos problemas de estabilidad, ya que el coro debía tener el mismo ancho que el octógono, y más aún cuando se ampliaron los vitrales.

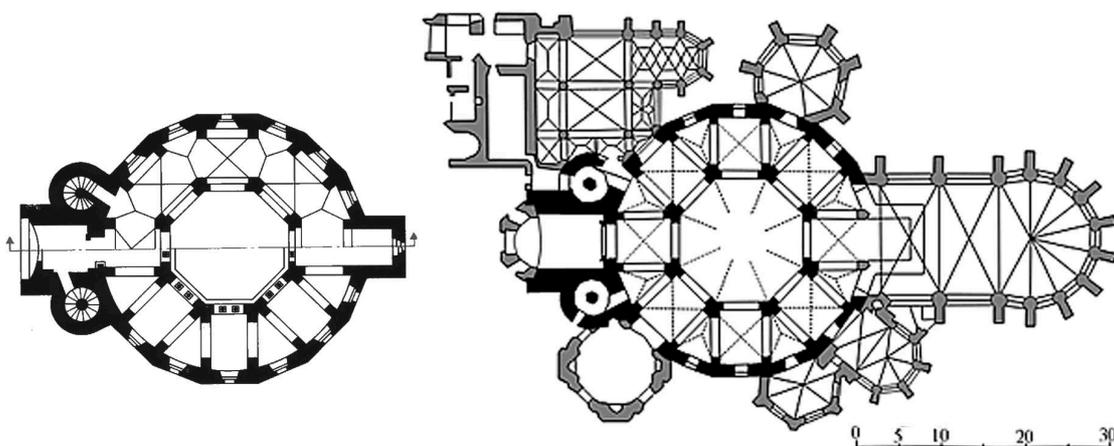


Ilustración 2-9. Planta de la capilla Palatina de Aquisgrán: original, izquierda y actual, derecha.

Fuentes: elquitasol.blogspot.com.es, izquierda; arteguias.com, derecha.

2.4.1.5 Iglesia del Santo Sepulcro, Cambridge.

Es la más tardía y más próxima a la iglesia de la Vera Cruz. Se construyó en torno a 1130 por parte de la Hermandad del Santo Sepulcro. Se la conoce como “la iglesia redonda” por su forma. Parece inspirada en la iglesia del Santo Sepulcro de Jerusalén, y tiene además relación con las Cruzadas, los Templarios y la Orden de Malta.

La planta de esta iglesia es circular, delimitando el deambulatorio con ocho columnas macizas. El presbiterio se añadió posteriormente, en el siglo XIII, y en el siglo XV se reconstruyó, momento en que se añadió también el campanario que desapareció en la restauración del siglo XIX.

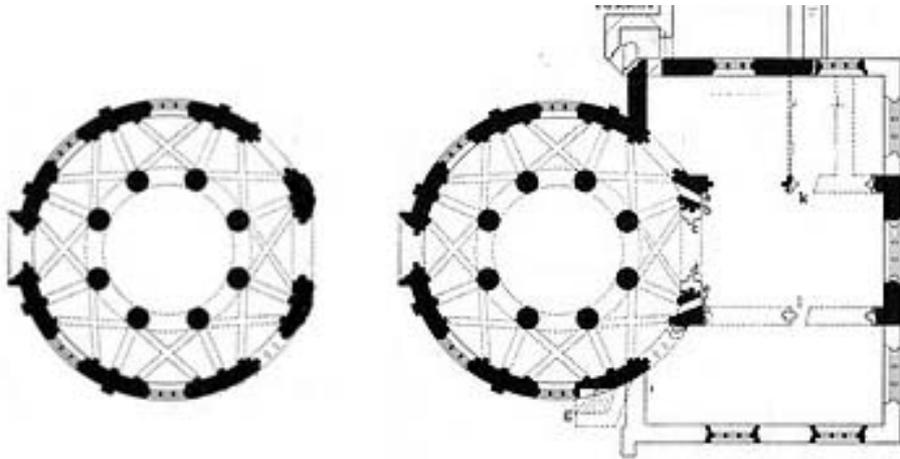


Ilustración 2-10. Planta de la iglesia del Santo Sepulcro de Cambridge: original, izquierda y actual, derecha.

Fuente: plantacentral.wix.com.

Es la única de las descritas en este apartado a la que se accede directamente al deambulatorio a través de una portada –igual que en la Vera Cruz, que consta de dos portadas-, sin tener que hacerlo a través de un nártex, atrio, espacio porticado o columnata. También es la única que, originalmente era completamente circular, sin tener ábsides, presbiterio o basílica que le confiriera un esquema longitudinal.

Esta iglesia es la más parecida a la iglesia de la Vera Cruz. El estado actual de la planta consta únicamente de la parte circular y las tres naves, adosadas a tres secciones de la planta. Sin embargo, puesto que inicialmente solo era la parte circular, sus columnas están repartidas equidistantemente, no dejando lugar a una posible estructura longitudinal.

Lo que tienen en común estos cinco templos y que no comparten con la Vera Cruz es la amplitud del edículo central. En todas ellas tiene múltiples accesos y muy amplios alrededor del deambulatorio, además de ser muy elevado y tener iluminación natural desde el exterior, todo lo contrario que la Vera Cruz que, además de no tenerla, el edículo tiene doble altura, siendo la parte baja un espacio muy constreñido.

2.4.2 Geometría

Una vez descritos algunos templos similares, se va a llevar a cabo un análisis y una descripción profunda de la geometría de la iglesia de la Vera Cruz, así como se aportarán diversas interpretaciones sobre el significado de cada espacio. Se observarán similitudes con los templos anteriormente descritos y se verán aspectos que hacen de esta iglesia un templo único y especial, por ejemplo, el gran abanico de estilos que en ella se pueden identificar.

La iglesia de la Vera Cruz es de las más antiguas de Segovia. Queda enmarcada dentro del estilo románico, aunque muy tardío, y tiene fuertes influencias orientales en diversos elementos, tanto en la planta como en el sistema de cubrición. Además tiene influencias de estilos anteriores, posteriores y contemporáneos. Por ejemplo, la cúpula cordobesa que cierra la estancia superior del edículo central tiene similitudes con una iglesia próxima (tanto en su localización como en su fecha de construcción), la iglesia de San Millán. Este tipo de bóveda es de la época del califato, y es una muestra de la aplicación de las estructuras funcionales moriscas a los edificios románicos *que constituye una de las más trascendentales aportaciones de España a la revolución del arte medieval* (De Lojendio y Rodríguez, 1985). Se aprecian también aspectos insinúan el inicio del gótico en las ojivas y nervaduras (Castán Lanaspá, 1990).

Para comenzar a comprender la configuración del templo, Merino de Cáceres realiza una analogía entre la iglesia de la Vera Cruz y el templo del Santo Sepulcro de Jerusalén. Describe la planta de esta iglesia como un compendio del *Anastasis* y el *Martyrium* del complejo constantiniano, esto es, la superposición de un esquema longitudinal de tres naves (siendo la nave central más ancha que las naves laterales) y de un esquema centralizado conformando dos espacios concéntricos, aunque en el Santo Sepulcro de Jerusalén ambos espacios no estaban fusionados (Ilustración 2-11).

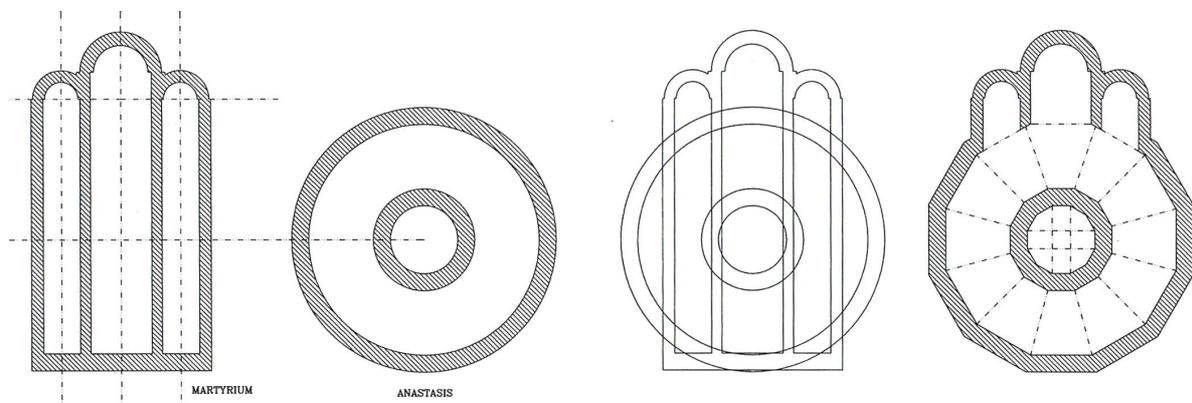


Ilustración 2-11. Esquema organizativo de la planta. Fuente: Merino de Cáceres, 1998.

Esta planta no es convencional, aunque como se ha visto es distintiva de las iglesias sepulcrales o dedicadas a mártires, con estructura radial, nave circundante, denominadas “iglesia-rotonda” y un cuerpo central.

La iglesia de la Vera Cruz tiene planta dodecagonal, con edículo central dividido en dos alturas, a la que se le añaden tres ábsides cilíndricos, paralelos entre sí en el lateral este, un cuarto ábside, con una forma no definida, y la torre cuadrada. Estos dos últimos se ubican al norte y sur de la hilera que conforman los ábsides respectivamente, y son posteriores a la construcción inicial.

Debido a estos cuerpos añadidos al dodecágono, en ocasiones ha habido confusiones y se ha calificado el polígono como hexágono, octógono o decágono. Este error de percepción indica la dificultad de comprensión que presentan el espacio y la estructura para el visitante.

El muro de cerramiento es dodecagonal a exterior, pero a interior tiene traza circular, salvo los dos lados que albergan las puertas de acceso, a sur y oeste, que también son planos en el interior. Además el dodecágono no es perfectamente regular, puesto que el lado oeste y el este, que marca la embocadura del ábside central, son ligeramente mayores, aspecto que insinuaría una nave central inexistente.

La iglesia tiene dos puertas de acceso ubicadas, según los cánones, en el sur y en el oeste. Ambas con clara morfología románica pero diferentes entre sí. La puerta que se abre al sur es muy sencilla, con una pareja de columnas a cada lado, con dos capiteles vegetales y dos animados y cuatro arcos. En esta puerta se aprecia una inscripción referente a un enterramiento, de los muchos que circundan el templo, algunos de ellos visibles actualmente.

Por otro lado, la portada oeste es más compleja y parece situarse en un estilo artístico más evolucionado, con evidente influencia cisterciense, sobre todo en el apuntamiento de los arcos y la decoración en zigzag de las arquivoltas. Tiene cierto paralelismo con la portada de acceso a la basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén, a pesar de que aquella es de doble arco. Esta portada se enmarca en dos contrafuertes, visiblemente mayores que el resto, que muestran restos de haber tenido adosado un pórtico en algún momento pasado.

El interior de la iglesia es completamente abovedado. La nave circundante está cubierta por una bóveda de cañón anular, con doce arcos fajones de refuerzo. Los ábsides cuentan con una bóveda de horno, habitual en el románico.

El edículo central conforma el eje del templo. Se divide en dos alturas, la superior contiene un altar y dos bancos corridos a lo largo del murete. La estructura del edículo recuerda al Árbol Sagrado, una palmera cuyas ramas serían los arcos que constituyen las bóvedas. Este edículo, igual que toda la iglesia, no está exento de incógnitas.

Comenzando por la estancia inferior, es un espacio de planta dodecagonal, con una bóveda de crucería, con dos nervios a 45° de los ejes de la iglesia. A esta estancia se accede a través de cuatro puertas en forma de arco apuntado muy profundas, que se abren al deambulatorio en los ejes de la iglesia, siendo ligeramente más anchas las del eje principal. Las dimensiones de esta estancia son muy reducidas y forman un espacio comprimido, tanto en sus accesos como la estancia en sí misma.

Las puertas norte y sur tienen escasamente 1,80 metros de altura y 80 centímetros de ancho. Mientras, la estancia tiene 2,65 metros de altura en el centro de la cúpula, siendo el diámetro interior de 5 metros, creando una proporción realmente baja. Sin embargo, los nervios de la cúpula apoyan sobre columnas en las que no se ve su basamento, que podrían estar ocultos al haber subido el nivel original del pavimento.

A esta suposición se llega observando las columnas del deambulatorio, que se apean en plintos. Si realmente estas columnas de la estancia inferior del edículo central fueran iguales que las del deambulatorio, habría que rebajar el nivel del suelo aproximadamente un metro (Figura 2-1). Esta nueva cota del pavimento haría que el volumen de la estancia tuviera una proporción sesquicuarta ($\text{altura} / \text{diámetro base} = 1,25$), una proporción armónica y en sintonía con el trazado general de la iglesia (Merino de Cáceres, 1998).

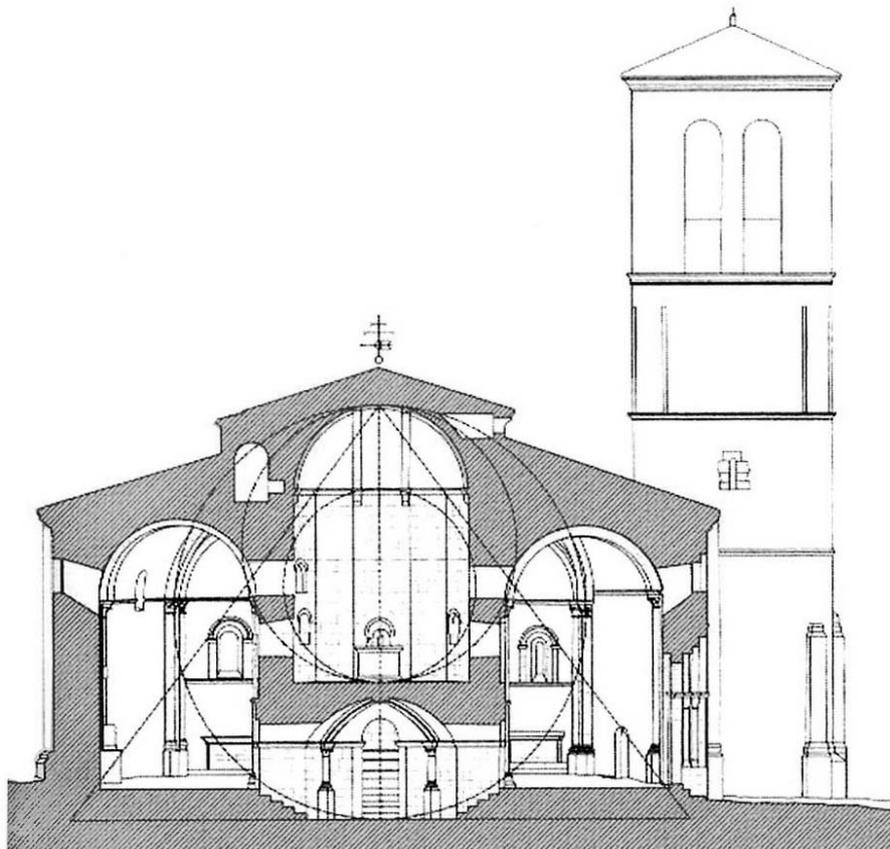


Figura 2-1. Sección transversal (eje Norte-Sur) de la iglesia con la estancia inferior del edículo en su supuesto estado original. Fuente: Merino de Cáceres, 1998.

Esta configuración justificaría la esencia de esta estancia, adquiriendo una condición de cripta, dejando de ser el espacio residual que es en la actualidad. Otros autores también han definido como ‘cripta’ esta estancia inferior del edículo central, José Pijoan lo describe de la siguiente manera:

Tiene una nave circular, ambulatorio de los cofrades, mientras en el centro queda, aislada del exterior, la cripta para el trozo del Santo Madero. Encima de la Cripta está el altar, invisible para los que ambulaban por la nave. La disposición hace sospechar una liturgia misteriosa y secreta de los templarios.

Pijoán ya dota de un ambiente misterioso a la estancia superior, tanto por su significado como por su utilidad. Para empezar, la altura de esta estancia superior se identifica desde el exterior sobresaliendo de la cubierta a modo de “linterna”, pero una interna que no ilumina la estancia. Más interrogantes surgen al observar el acceso a la estancia.



Ilustración 2-12. Antepecho de la escalera. Montaje a partir de fotografías propias.

Actualmente se accede a través de una doble escalera, situada en el lateral oeste, pero que se acopla con dificultades al muro del edículo. Se aprecia que las columnas del deambulatorio son continuas “atravesando” la escalera; y los arcos ciegos que hay en cada lienzo del muro del edículo central no se eliminan, cabría pensar que estos lienzos deberían haber sido un único plano, sin retranqueos. Además la fábrica claramente no se corresponde con la original y parece añadida con bastante posterioridad, a pesar de que el perfil del arco en que se apoya tiene una moldura románica (Ilustración 2-12), los peldaños y el esgrafiado del antepecho son más renacentistas. Incluso la escalinata no llega a la cota del pavimento de la estancia superior y, en el espesor del muro, se encuentra un peldaño adicional. Por esto, se puede concluir que Pijoán estaba confundido puesto que,

al menos inicialmente, la intención no era la de ser altar para las liturgias por carecer de acceso.

A la estancia se accede a través de un arco apuntado en el lateral oeste del estilo románico tardío de toda la iglesia, en el que quedan vestigios de una carpintería existente de cerramiento interior, incluso con tranca para el pasador. Enfrente de este acceso hay una ventana similar que se asoma al ábside central y que tiene claras muestras de haber sufrido desperfectos en el arranque de la moldura del arco. Igual que en la puerta de acceso, se ven muestras de haber tenido carpintería de cerramiento en el interior, también con tranca. Esta ventana tiene un antepecho de construcción claramente posterior. Estos aspectos pueden llevar a concluir que a esta estancia no tenía acceso fijo y se cerraba con facilidad desde el interior.

En los laterales norte y sur hay dos pequeñas ventanas abocinadas y con fuerte derrame hacia el deambulatorio, donde se aprecian como arpilleras. En los lienzos contiguos a estas dos ventanas, hacia el este, hay dos nichos con arcos de medio punto y una gran profundidad, pudiéndose tratar de relicarios. En la actualidad albergan representaciones de San Juan y de Nuestra Señora de Filermo, patrona de la Orden de Malta (Ilustración 2-13).



Ilustración 2-13. Nichos con las imágenes de los patrones de la Orden de Malta. Fotografías propias.

En la parte alta de la estancia, antes del arranque de la bóveda, hay ocho ventanas en arco de medio punto repartidas de forma extraña. Lo primero que llama la atención es la asimetría con la que se reparten en el perímetro del dodecágono respecto al eje longitudinal de la iglesia. Al ser un número par de ventanas y una de ellas ubicarse en el lateral oeste, se distribuyen desde el lienzo sur hacia el oeste, llegando al lienzo norte y ocupando también el contiguo hacia el este. Y también llama la atención su ubicación en los lienzos, puesto que no están centradas en el mismo, salvo la del lienzo oeste. Las demás están desplazadas hasta la arista oeste de cada lienzo (Ilustración 2-14). Estos dos aspectos son claramente intencionados, pero, inicialmente, no se conoce su significado.

Estas ventanas comunican con el deambulatorio, apoyándose justo en la imposta de arranque de la bóveda del mismo. Merino de Cáceres no les atribuye gran utilidad, puesto que la luz que conducen a la estancia central es mínima, pero tras el análisis acústico, veremos si es así o tienen una función acústica.



Ilustración 2-14. Ventanas de la estancia superior del edículo central y puerta de acceso a la estancia de retiro.
Montaje a partir de fotografías propias.

En lo alto de esta estancia se ve un portoncillo (Ilustración 2-14), ahora cerrado, a través del cual se accede a una pequeña estancia, que incluso es visible desde el exterior. Esta estancia, que describe y representa Merino de Cáceres (Figura 2-1), serviría de celda de retiro voluntario dentro de alguno de los grados del proceso de iniciación a los que se sometían algunos caballeros (García Atienza, 1995). Según Merino de Cáceres es *una pequeña cámara abovedada en cañón circular, de 2m. de larga por 1,10 de ancha y 1,98 m. de altura*. Tenía un pequeño ventano que comunicaba con la estancia superior de la cúpula, pero actualmente está cegado.

El acceso aún mantiene una carpintería, aparentemente la original, que abre hacia el pasadizo que desemboca en la sala y que se cerraba mediante tranca, por lo que solo se

podía cerrar y abrir desde el interior. Esta pequeña estancia se aprecia desde el exterior, mostrándose como un prisma adosado a la linterna y sobre la cubierta del deambulatorio (Ilustración 2-15). Hay otras tres cámaras secretas sobre el edículo central, una de ellas la representa Merino de Cáceres en su sección (Figura 2-1), situadas en los ejes del templo, pero a ellas se accede a través de huecos abiertos en la cornisa. Estas estancias son muy pequeñas y se supone que servían de escondite para objetos valiosos.



Ilustración 2-15. Estancia de recogimiento vista desde fuera. Fotografías propias.

Estas cámaras se sitúan sobre la bóveda que encierra la estancia superior del edículo central. Es una bóveda 'cordobesa', en la que se observa la mayor longitud de los lados este y oeste del dodecágono de la planta, comentado anteriormente. Así, los pares de nervios paralelos dos a dos forman un rectángulo en la cima de la bóveda (Ilustración 2-16). La bóveda es muy similar a una de las que hay en la cercana iglesia de San Millán.



Ilustración 2-16. Bóveda 'cordobesa'. Montaje a partir de fotografías propias.

Para terminar con el edículo central, destacar la mesa de altar de la estancia superior. Esta no se ubica en el centro de la misma, como dibujaron Lenoir y Lampérez en sus levantamientos, sino que está notablemente desplazada hacia el este, donde se ubica el ábside principal. Llama la atención su ornamentación, fuertemente cargada de rasgos orientales (Ilustración 2-17), que Lozoya justifica con analogías con el templo de Salomón y la mezquita de Al-Sakhra o, más próximo, el claustro de San Juan de Duero, el Soria (Merino de Cáceres, 1998).

Sin embargo, parece que inicialmente estuviera adosada a un muro, puesto que la cara trasera es completamente lisa. Es probable que su emplazamiento inicial fuera la capilla de la torre, en el muro donde se labró el relicario del *Lignum Crucis* en 1520. Algunos autores le han atribuido la función de pedestal para la imagen del Cristo yacente, algo improbable por las pequeñas dimensiones de la mesa respecto a la urna funeraria que actualmente se encuentra en la parroquia de Zamarramala. Además, la orientación de la mesa, norte-sur, no está dentro de los preceptos de la liturgia de los enterramientos. Del mismo modo, tampoco es un altar en el que los que iban a ser investidos caballeros velaran sus armas la víspera de su cruzamiento.



Ilustración 2-17. Frontales y parte posterior (derecha) del altar de la estancia superior del edículo central.

Fotografías propias.

Saliendo del edículo central, los ábsides estructuran y alinean claramente la iglesia. El eje longitudinal está perfectamente orientado este-oeste, aspecto no casual, ya que así, al amanecer en el solsticio de verano, la luz del Sol entraría por la ventana del ábside central y llegando a la estancia inferior del edículo central. Actualmente, delante de esta ventana central se encuentra la imagen de Cristo crucificado, talla también del siglo XIII (AA. VV., 2001) que impide este hecho (Ilustración 2-18). Los dos ábsides que se sitúan a cada lado del central son más pequeños que este. Todos son muy sencillos, constando de un cuerpo recto y bóvedas de horno. Los tres cuentan con una ventana central y una lateral, abriéndose al sur, de posterior construcción.

En cuanto al sistema de construcción, toda la iglesia está construida con sillería, mientras que en los ábsides predomina la mampostería, pudiéndose identificar en la cara exterior de sus muros huella de encofrados, sobre todo en la parte inferior de los cilindros.

Interiormente los materiales que predominan en el acabado son la piedra y el guarnecido pintado, salvo el retablo que está en el lateral norte y las dos puertas de acceso que son de madera. Todas las paredes están acabadas con un guarnecido salvo los muros verticales del edículo central, los muros en los que se encuentran las dos puertas de entrada y los nervios tanto de la bóveda del deambulatorio como de las dos cúpulas del edículo central, donde se deja la piedra vista.

La torre y la sacristía son elementos claramente posteriores, por lo que no se van a describir, al ser adiciones a la iglesia original. Si cabe mencionar una edificación exenta de la iglesia, aprovechando el terreno escarpado, cuya disposición no guarda relación con la iglesia, ni en su orientación ni en su composición. Merino de Cáceres hace alusión a testimonios de Francisco Javier Cabello y Dodero donde describe esta edificación como *un bloque rectangular [...], de buena sillería, que en su interior alberga una cámara cubierta por una bóveda de cañón apuntado*. Dodero planteó la hipótesis de que fuera la base de una torre original, y que la actual la reemplazara, aunque esta hipótesis no es aceptada por la planta rectangular de la edificación. Actualmente no se puede acceder a esta estancia, pero se tiene constancia de que tenía las funciones de osario, siendo una cripta funeraria. Seguramente se realizó en ese lugar por la facilidad de construcción ante la imposibilidad de construirla debajo del propio templo, y siendo más fácil y económico que excavarla por completo. No obstante, está documentada la existencia de una capilla, la capilla de San Miguel, en ese lugar.

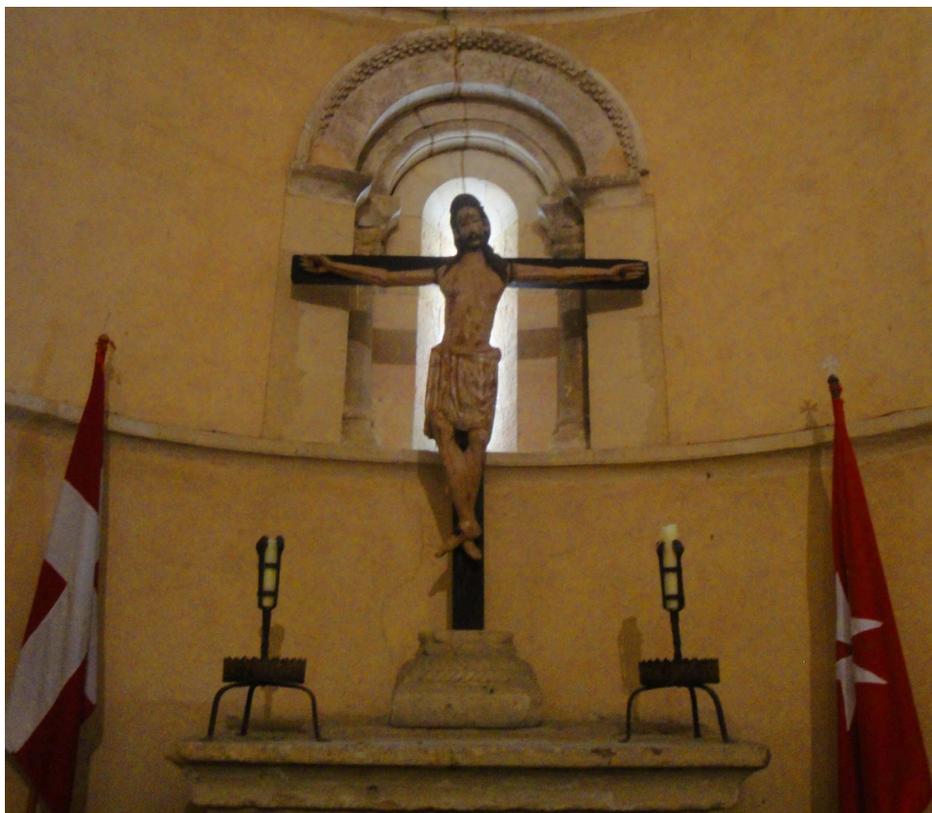


Ilustración 2-18. Imagen de Cristo crucificado delante de la ventana del ábside principal. Fotografía propia.

Merino de Cáceres, además de esta descripción de elementos y aspectos identificables a simple vista, expone ciertos aspectos relacionados con lo que denomina *la metrología y composición* de la iglesia, obtenidos tras mediciones propias.

Llega a la conclusión de que la unidad de pie empleada para su construcción fue extraña, de 28,78852 cm, dimensión que no guarda relación con las medidas de pie utilizados asiduamente en Castilla, siendo el más común el de 27,86 cm. de Burgos. Según este módulo, la iglesia se inscribe en un rectángulo de 75x100 pies, y el dodecágono en un cuadrado de 75 pies de lado. El dodecágono se configura mediante cuatro triángulos equiláteros circunscritos en una circunferencia de 75 pies de diámetro. Los ábsides también guardan simetrías, pero no las expone. Si que describe la sección, mencionando que también aparece el triángulo equilátero, (Figura 2-1), y generalmente con valores múltiplos de 3. Como se ha indicado anteriormente, le-Duc dice que el triángulo equilátero era uno de los signos que adoptaron los Templarios, por la presencia que tuvo el número 3 en su origen. A este triángulo equilátero se le suman el triángulo rectángulo isósceles y el *triángulo egipcio* o proporción aurea.

Es decir, la composición de la iglesia se basa en el sistema *ad triangulum*, conocido en la Edad Media como *secundum germanicam symetriam*, característico de las composiciones góticas, que contrasta con las composiciones *ad quadratum* más propia de los edificios románicos.

Tras haber reconocido todos los elementos y todas las proporciones, basándose en la superposición de los esquemas *Anastasis* y *Martyrium*, entiende esta iglesia de la siguiente manera. El espacio inferior del edículo central simboliza la tumba de Jesús, y la estancia superior el Anastasis, lugar de resurrección. Mientras que la capilla de la base de la torre sería el Calvario, en la que se veneraría el *Lignum Crucis*, reliquia del Santo Madero.

Todos los aspectos recogidos tienen un significado que muchos historiadores o arquitectos han tratado y vinculado a cuestiones religiosas, de simetrías, ejes y proporciones. Tras el estudio acústico, se observará si tienen además una función acústica, que potencie el ambiente de los ritos que celebraban los Templarios.

3 ACÚSTICA: LA TEORÍA

El estudio acústico de un recinto no se realiza de una sola manera, o con una única teoría, sino que hay tres formas de analizar un recinto acústicamente y cada una de ellas soluciona diferentes incógnitas y sirve para conocer diferentes aspectos del recinto. Estos métodos son la acústica geométrica, la acústica estadística y la acústica ondulatoria.

Inicialmente se expondrán brevemente algunos conceptos previos importantes para la comprensión de los siguientes. Posteriormente van a mostrarse dos de los métodos de análisis y las respuestas que aportan, empezando por los conceptos más básicos de la acústica geométrica, continuando por la acústica estadística y los parámetros que definen el comportamiento del sonido en un recinto y en un punto en concreto. No se tratará la acústica ondulatoria por la gran complejidad geométrica de la iglesia. Esta acústica ondulatoria se emplea sobre todo para la localización de modos propios en salas paralelepípedicas.

Finalmente se profundizará más en tres de los parámetros que definen el comportamiento acústico de un recinto: el tiempo de reverberación, el C80 y el STI, y se introducirá el programa informático empleado para hacer la simulación, describiendo sus características, exigencias a la hora del modelado del recinto y los parámetros que aporta.

3.1 Conceptos previos

Para comenzar la introducción a la teoría acústica deben conocerse diferentes conceptos que se van a emplear tanto en los métodos de análisis acústico como en la simulación acústica digital.

Lo primero es comprender que el sonido es una variación en la presión del aire, que se comprime y expande por una vibración, ya sea de las cuerdas vocales, o de las cuerdas o la membrana de un instrumento, y que dependiendo de la amplitud de esta vibración, se dan diferentes frecuencias.

Los sonidos emitidos en un recinto se reparten por todo el volumen creando así el campo acústico, que es lo que se mide. El oído humano puede percibir desde $2 \cdot 10^{-5}$ Pa hasta 10^3 Pa. Entre la mínima y la máxima hay una gran diferencia que hace difícil el trabajo con ellas, pero se observó que el comportamiento del oído humano se aproxima más una proporción logarítmica. Por esto, se trabaja con niveles de presión, obtenidos mediante la ley de Weber-Fechner:

$$L = K \cdot \log P \quad [1]$$

En escala logarítmica, las unidades son los decibelios (dB), utilizando la ponderación A para simular mejor el comportamiento del oído humano, donde el mínimo serían 0 dBA y el máximo 174 dBA, aunque se determina en 120 dBA el umbral del dolor.

En cuanto al emisor, en este caso es una o varias personas, que pueden ser tanto hombres como mujeres, como se ha comentado con anterioridad. Es importante mencionar que la voz del hombre y de la mujer son diferentes tanto en nivel de emisión como en participación de las frecuencias. Los niveles medios de presión acústica a 1 metro de los labios del emisor es de 64 dBA en hombres y de 60 dBA en mujeres, además, los hombres tienen mayor participación de bajas frecuencias mientras que la voz de la mujer tiene mayor contenido en altas frecuencias. Esta diferencia en el espectro de frecuencias es importante puesto que no se irradian igual las frecuencias bajas que las altas, mientras que las frecuencias altas se irradian solo en un estrecho ángulo frente al emisor, las frecuencias bajas lo hacen más uniformemente.

La energía acústica en un punto y en un momento determinado se obtiene mediante la suma de ondas directas y reflejadas. Las ondas directas se ven atenuadas por la absorción del aire y la divergencia geométrica, que es la variación del nivel con la distancia entre el receptor y el emisor. La intensidad, que está relacionada con el cuadrado de la presión eficaz, disminuye con el cuadrado de la distancia, puesto que la intensidad que se genera se reparte en una esfera. Con esta relación se obtiene que, al aumentar la distancia al doble, el nivel de presión sonora disminuye en 6 dB. Esta atenuación no distorsiona el espectro de frecuencias puesto que es bastante similar en todo el espectro.

Por otro lado, las ondas reflejadas están atenuadas, además de por la divergencia esférica y la atenuación del aire, por la absorción de energía acústica en cada reflexión. Esta atenuación depende del material y de la frecuencia, por lo que el sonido reflejado se percibe con mayor distorsión que el sonido directo. Cuando las ondas sufren gran cantidad de reflexiones ven disminuida su energía poco a poco hasta que desaparece después de cierto tiempo. A este fenómeno de superposición de ondas se le llama reverberación. Si pasado cierto tiempo llega una onda con suficiente energía que se percibe como un sonido diferente del sonido directo, se denomina eco. Es decir, la reverberación provoca una prolongación del sonido directo mientras que el eco provoca una repetición. Estos dos conceptos se analizarán con más profundidad más adelante.

La suma de niveles (LP o SPL –siglas en inglés de Sound Pressure Level-) de todas las ondas que llegan a un punto se realiza mediante una suma logarítmica de presiones sonoras (Pa), no del nivel de presión sonora (dB). Se realiza mediante la expresión:

$$LP_i = 10 \log \frac{\sum_i (p^2)_i}{p_0^2} = 10 \log \sum_i \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad [2]$$

Donde p son las presiones a sumar y $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Con esta expresión también se obtienen relaciones que posibilitan la suma de niveles en decibelios. Por ejemplo, dos intensidades iguales suponen un aumento de 3 dB del nivel de presión sonora. Mientras que si la diferencia entre dos niveles es mayor de 15 dB, el menor se considera despreciable, incluso si la diferencia es de 10 dB (Gráfico 3-1).

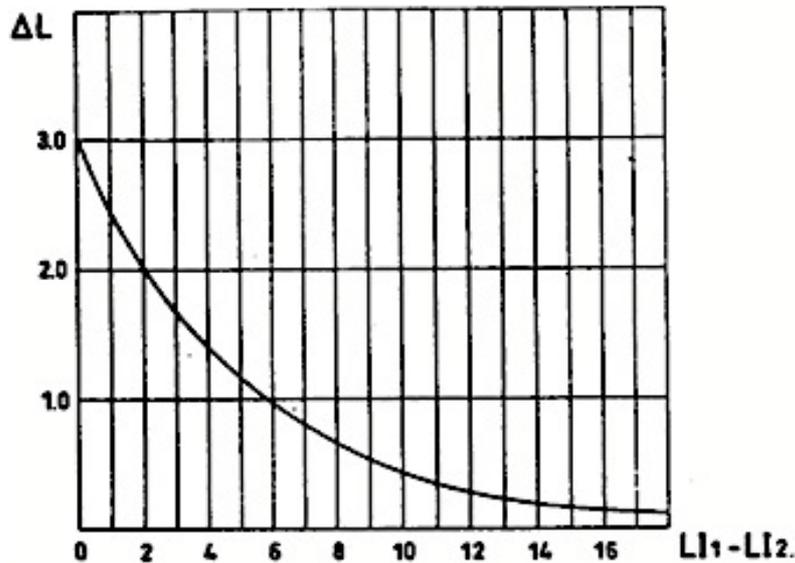


Gráfico 3-1. Gráfica para realizar sumas de niveles de intensidad. Fuente: Llinares, Llopis y Serrano, 2011.

Sin embargo, la calidad del sonido depende de si se está escuchando una persona hablando o música, y del tipo de música. De cualquier modo, es importante que haya una gran componente de sonido directo, además de equilibrio entre reverberación y claridad. Asimismo, en la música, es necesario un refuerzo de las frecuencias graves, además de una gran difusión que produzca la sensación de que el sonido rodea al receptor y le llega desde todas las direcciones con similar intensidad.

Un último concepto que tiene relevancia en este recinto es el Principio de Huygens (Figura 3-1 a), que enuncia que cada punto de un frente de onda puede considerarse como fuente de emisión de pequeñas ondas secundarias que se propagan en todas direcciones con una velocidad igual a la de propagación de las ondas (Llinares, Llopis y Sancho, 2011). Este principio explica los fenómenos de difracción, donde el borde de un obstáculo se convertiría en foco emisor, emitiendo ondas esféricas en todas las direcciones (Figura 3-1 b y c). En el caso de la iglesia de la Vera Cruz, este principio puede tomar importancia por la cantidad de ventanas que conectan la estancia superior del edículo central y el deambulatorio, ventanas que se convertirían en emisores en ambos sentidos dependiendo de dónde se situara el emisor.

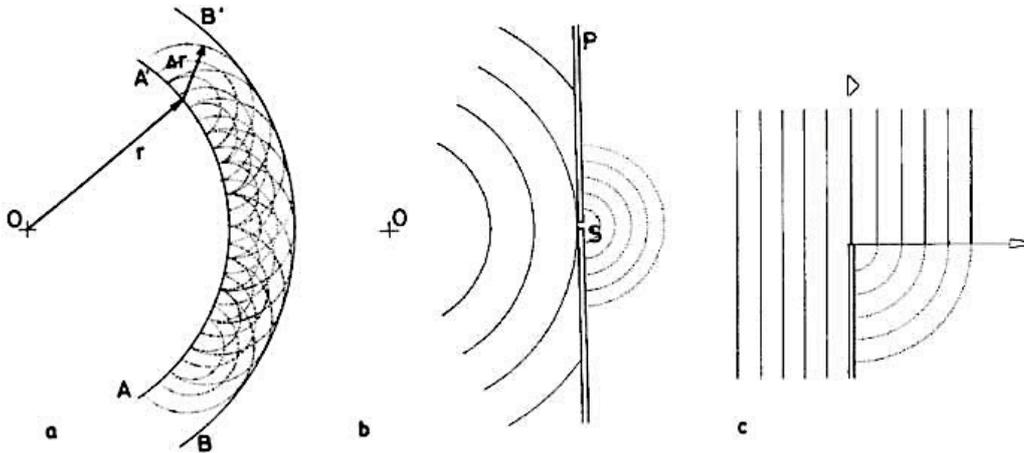


Figura 3-1. Principio de Huygens: a) frente de onda; b) y c) fenómenos de difracción.

Fuente: Llinares, Llopis y Serrano, 2011.

3.2 Métodos de estudio acústico de recintos

El estudio de la distribución de la energía en un recinto tiene diferentes métodos, cada uno de los cuales analiza unos aspectos y, además, pueden diferenciarse en el tiempo desde que se inicia la emisión del sonido. Así, si la acústica geométrica se emplea para el estudio de la distribución del sonido directo, las primeras reflexiones y evitar el riesgo de eco de una sala; y la acústica estadística para analizar la reverberación, podría decirse que la acústica geométrica se centraría en el estudio de los primeros instantes del sonido mientras que la acústica estadística en el tiempo en que el sonido tarda en hacerse imperceptible (Figura 3-2).

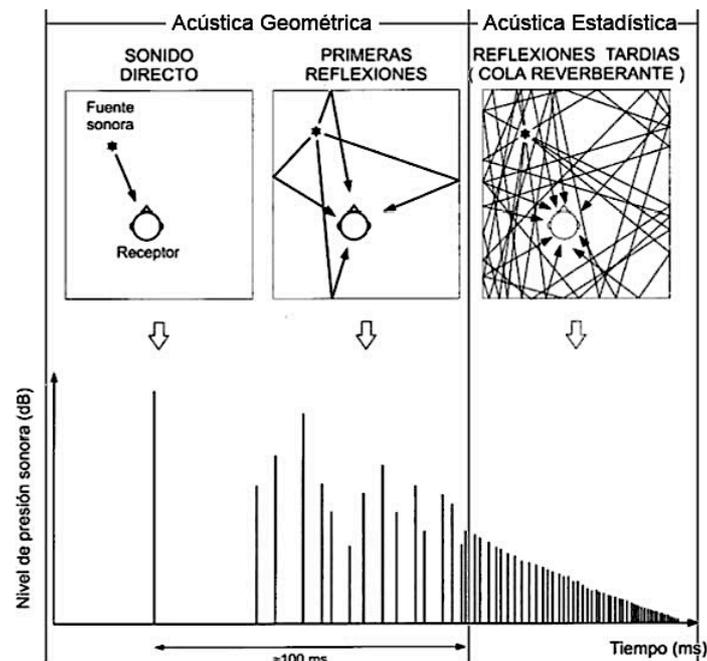


Figura 3-2. Gráfico en el tiempo de la recepción del sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante.

3.2.1 Acústica geométrica

Es la parte de la acústica que estudia la distribución del campo acústico mediante el trazado de rayos. Con este método se encuentran posibles focalizaciones indeseadas del sonido o la presencia de ecos en la sala. Se basa en la propagación en línea recta del sonido, puesto que por el Principio de Fermat, toda onda se propaga por el camino más rápido, el más corto para velocidad constante y, la línea recta si no hay obstáculos.

Si en el recorrido del sonido se encuentran obstáculos sólidos, parte de la energía vuelve a la sala, fenómeno de reflexión, mientras que si el obstáculo no es grande se produce la difracción, ya explicado con el Principio de Huygens. El fenómeno de reflexión se divide en dos tipos: la reflexión especular y la reflexión difusa. La reflexión especular sigue las Leyes de Snell, que enuncia que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 3-3 a). La representación de este fenómeno puede realizarse de este modo, trasladando el mismo ángulo sobre la normal del obstáculo o mediante el método de los focos imagen, que consiste en representar el foco real simétricamente respecto del plano obstáculo (Figura 3-3 b).

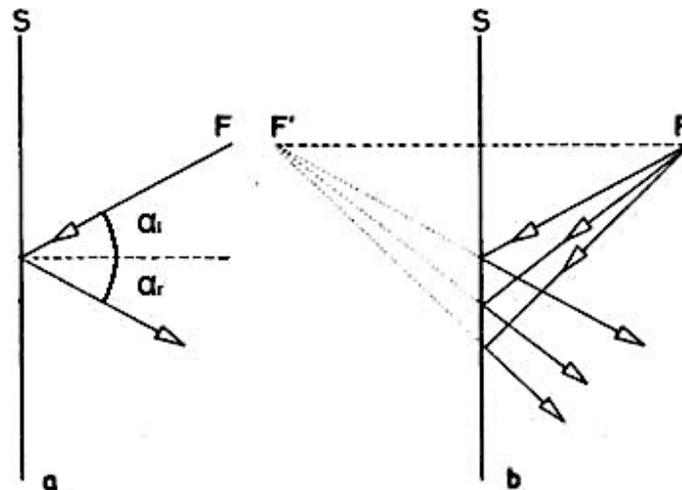


Figura 3-3. Modos de representar la reflexión especular: a) Ley de Snell: ángulo de incidencia igual al ángulo de reflexión. Elaboración propia; b) Foco imagen. Fuente: Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

Por su parte, la reflexión difusa se produce cuando la superficie del obstáculo es rugosa y el rayo de refleja en todas las direcciones, según la Ley de Lambert. Esta reflexión depende de la escala de la rugosidad y de la frecuencia. Así, las frecuencias altas (longitud de onda λ - pequeña) producen sombras acústicas al no poder rodear obstáculos y se reflejan de forma difusa en las rugosidades. Por otro lado, las bajas frecuencias (longitud de onda grande) sí que pueden rodear objetos, lo que ocasiona que, tras un obstáculo, el sonido sea más grave que el original. Precizando las dimensiones y las frecuencias a las que afecta, a una velocidad del sonido de 340 m/s:

- A una frecuencia de 34 Hz ($\lambda = 10\text{m}$), cualquier obstáculo resulta pequeño y no se producen difracciones.
- A 125 Hz ($\lambda = 2,5\text{m}$), el sonido bordea pequeñas superficies, columnas, mobiliario y las superficies rugosas reflejan especularmente.
- A 500 Hz ($\lambda = 68\text{cm}$), la mayoría de objetos no son grandes ni pequeños respecto a la longitud de onda. Se produce sobre todo reflexión difusa.
- A 2.000 Hz ($\lambda = 17\text{cm}$), cualquier objeto empieza a producir sombra acústica.
- A 8.000 Hz ($\lambda = 4\text{cm}$), cada irregularidad en una superficie se comporta como un espejo y refleja especularmente, es decir, una superficie rugosa produciría reflexión difusa. (Llinares, Llopis y Sancho, 2011).

En cuanto a la localización de focalizaciones, en esta iglesia no se aplica el estudio de superficies planas, sino que es más adecuado el estudio en superficies curvas. En este caso la reflexión también se produce en el mismo ángulo respecto a la normal en el punto, es decir, la línea que une el punto de incidencia con el centro de la circunferencia (Figura 3-4a, F_2). Este aspecto produce dos casos opuestos. Si el emisor se sitúa en el centro de la circunferencia (Figura 3-4a, F_1), todo el sonido emitido volverá a su posición en el mismo instante. Mientras que si el emisor se sitúa cerca de la circunferencia (Figura 3-4b), las reflexiones se realizan en puntos sucesivos de esta, formando triángulos, cuadrados, hexágonos etc., regulares, llegando al centro de la sala un pequeño porcentaje del sonido.

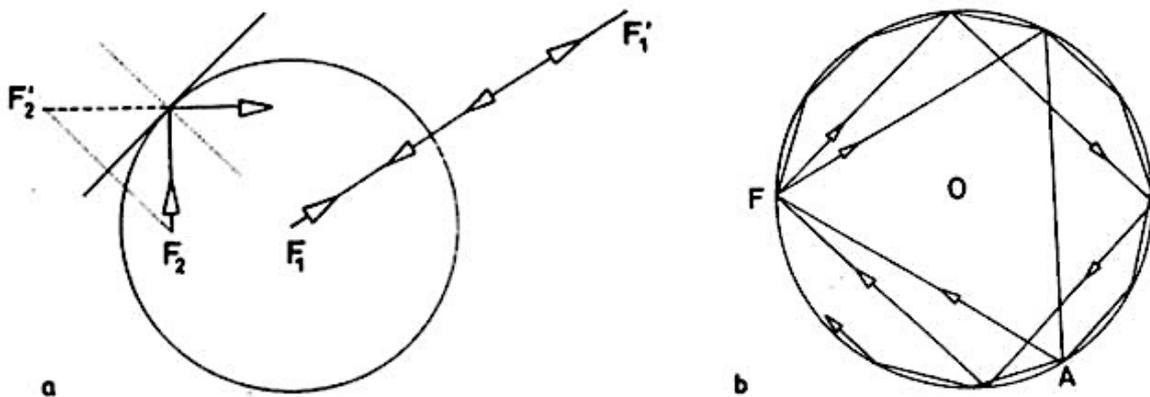


Figura 3-4. Reflexiones sobre una superficie curva: a) fuente en el centro y cualquier posición de la sala; b) fuente cerca del perímetro. Fuente; Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

Por otra parte, analizando las superficies curvas en sección, es importante la proporción entre la altura a la que se encuentra la superficie y su radio, dándose tres situaciones diferentes (Figura 3-5):

- a) Si la altura es igual o similar al radio, se producen focalizaciones.
- b) Si el radio es mayor al doble de la altura, la reflexión no es perjudicial, puesto la convergencia se reparte en toda la superficie inferior.
- c) Si el radio es menor que la mitad de la altura la concentración se produce en una zona no perjudicial, por encima de la posición del receptor.

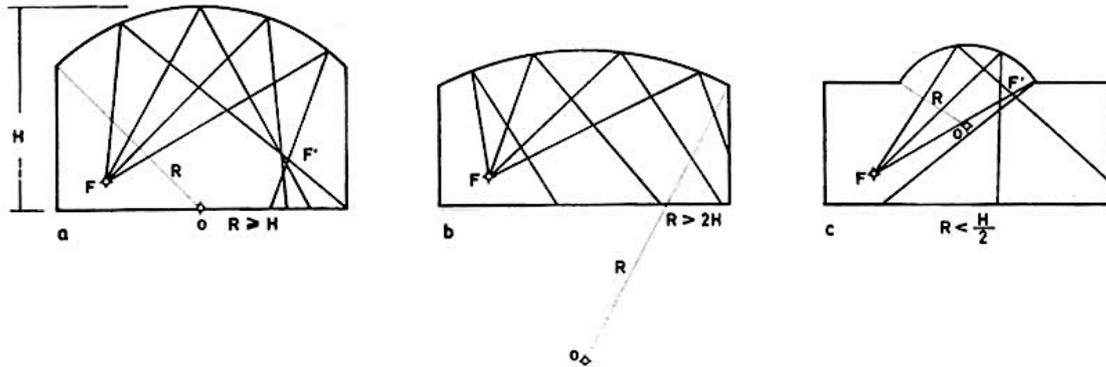


Figura 3-5. Reflexiones sobre un techo abovedado. Fuente: Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

Para concluir la acústica geométrica, es importante identificar posibles problemas de ecos. Como se ha mencionado anteriormente, se produce cuando una señal acústica emitida es percibida como dos o más señales desfasadas. El oído humano percibe dos sonidos como sonidos independientes cuando el desfase entre uno y otro es de 50 ms. Esto supone que, con una velocidad del sonido de 340 m/s, la diferencia máxima que puede haber entre el recorrido de dos sonidos para que no se produzca eco es de 17 m.

El método de localización de ecos es mediante la representación de la hipérbola límite, puesto que la definición de hipérbola es *lugar geométrico de los puntos del plano tales que el valor absoluto de la diferencia de sus distancias a dos puntos fijos, llamados focos (emisor real y emisor imagen) es igual a la distancia entre los vértices, la cual es una constante positiva*. Esto es, si hacemos una hipérbola cuyos vértices estén separados 17 m, la hipérbola diferenciará la zona en la que, entre el recorrido directo y el reflejado, hay más de 17 metros y se producirían ecos (Figura 3-6). Una forma rápida de saber que no se producirán ecos es observando si el receptor está a menos de 8,5 metros de la pared de la que recibirá el sonido reflejado.

Estos problemas de eco se solucionan introduciendo materiales absorbentes o muy difusores en aquellas superficies que sean susceptibles de provocar eco en algún punto de la sala para atenuar el nivel del sonido reflejado.

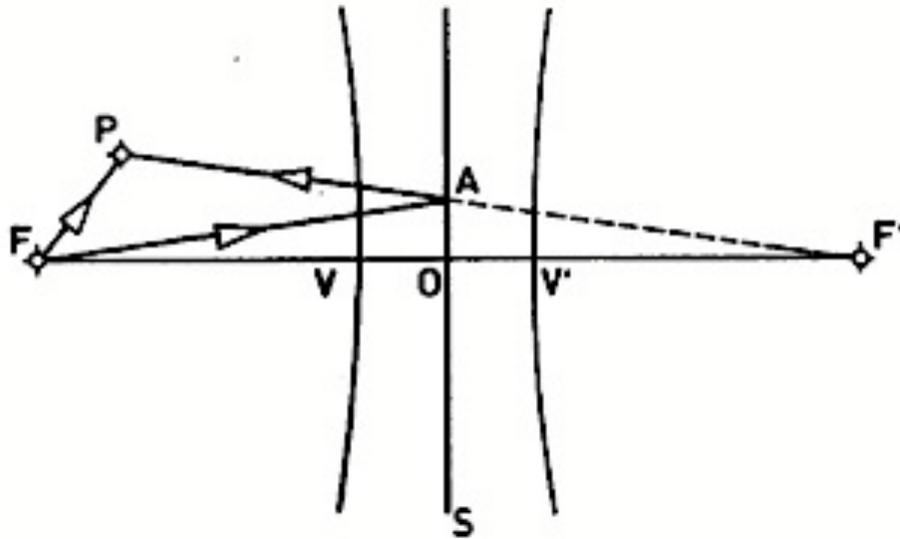


Figura 3-6. Hipérbola de eco. Fuente: Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

3.2.2 Acústica estadística

Evalúa estadísticamente la energía acústica en su conjunto. Cuando una fuente emite sonido en un recinto cerrado, el campo acústico del recinto empieza propagándose libremente y, posteriormente, se le van añadiendo las reflexiones sucesivas. El sonido dentro de un recinto no aumenta indefinidamente, sino que llega un momento en que el conjunto del recinto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la que emite la fuente sonora, y la energía entonces permanece estacionaria. Del mismo modo que, cuando se apaga la fuente, el sonido no desaparece instantáneamente, sino que durante un tiempo sigue percibiéndose energía que va siendo absorbida por la propia sala hasta ser inaudible. Este es el fenómeno de la reverberación.

La importancia de la reverberación radica en la necesidad de comprensión del mensaje emitido, consistente en diferentes sonidos individuales (ya sean sílabas en mensajes de palabra o notas en mensajes musicales) que están separados en el tiempo. La reverberación, persistencia del sonido en el recinto, puede ser tanto negativa como positiva. Negativa para los mensajes de palabra, puesto que enmascara unos sonidos con otros y se pierde claridad en el mensaje. Mientras que puede ser positiva dependiendo del tipo de música que se esté interpretando, ya que se prolongaría y reforzaría el sonido y se crearía la sensación de verse envuelto en la música, recibiendo sonido desde todas las direcciones del recinto.

La variación de la energía en un recinto cerrado desde que se comienza hasta que se detiene la emisión se divide en tres tramos a lo largo del tiempo (Gráfico 3-2):

- Tramo *a*, la densidad de energía aumenta de forma gradual y continua.
- Tramo *b*, régimen estacionario, la densidad de energía es constante.
- Tramo *c*, en el instante t_0 se detiene la emisión de sonido y la densidad de energía comienza a descender del mismo modo, continua y gradualmente.

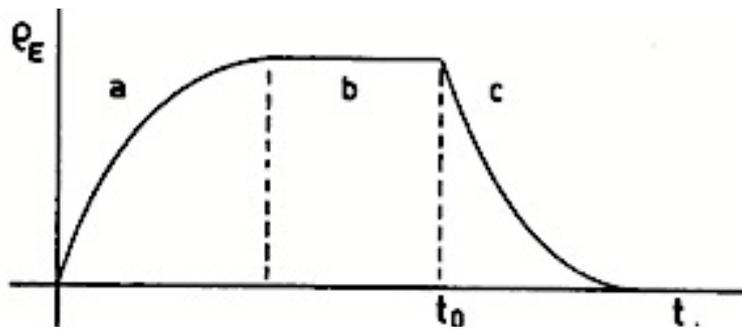


Gráfico 3-2. Variación de la densidad de energía con el tiempo. Fuente: Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

Un detalle importante en la reverberación es el concepto de campo difuso. Se define campo difuso como el *campo acústico en que todas las direcciones de propagación del sonido aportan la misma intensidad sonora, no solo en estado estacionario sino en cualquier momento del proceso del descenso del sonido* (Llinares, Llopis y Sancho, 2011). Según la acústica estadística, la reverberación solo pueden formularse en campos difusos.

3.3 Parámetros

Una vez introducidos ciertos conceptos importantes y básicos en el análisis acústico de recintos se van a definir los tres parámetros que más van a caracterizar el comportamiento acústico de la iglesia de la Vera Cruz, el tiempo de reverberación, el C80 y el STI, ambos relacionados con el fenómeno de reverberación anteriormente definido.

3.3.1 Tiempo de reverberación

Clement Wallace Sabine probó que la reverberación es un parámetro que permite evaluar la calidad acústica de una sala. El índice para medir este parámetro es el tiempo de reverberación, que Sabine definió como *el tiempo requerido, después de cesar la fuente, para reducir la energía presente en la sala a la millonésima parte de su valor en régimen estacionario* (Llinares, Llopis y Serrano, 2011). Así se representaría la velocidad con que se realiza el proceso y no la duración de la reverberación, que sería infinita.

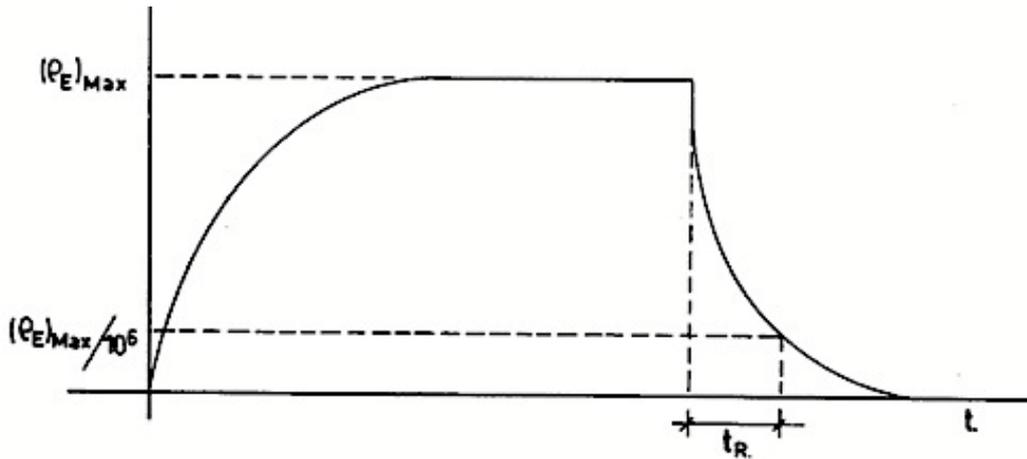


Gráfico 3-3. Definición gráfica del tiempo de reverberación. Fuente; Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

El proceso de ascenso y descenso de energía en el recinto es, por tanto, el mismo que en la reverberación (Gráfico 3-3), que expresado en escala lineal aumentaría y descendería exponencialmente, siendo procesos complementarios. Pero al representar este proceso en escala logarítmica, dado que la percepción del oído humano se aproxima a esta, se observa que el proceso de descenso, tramo de reverberación, es lineal, representando así una pérdida de sonoridad gradual y lineal (Gráfico 3-4).

Igual que en otros parámetros, al trabajar con la escala logarítmica se obtiene un valor que hace más sencillo trabajar con él, y más en este caso al pasar de descenso exponencial a lineal. De este modo, la millonésima parte del valor hablando de energía supone una diferencia de niveles de -60 dB. Por lo tanto, el tiempo de reverberación es *el tiempo necesario para reducir el nivel de presión acústica, en una sala, en 60 dB respecto al nivel estacionario, desde el instante en que ha cesado de emitir la fuente.*

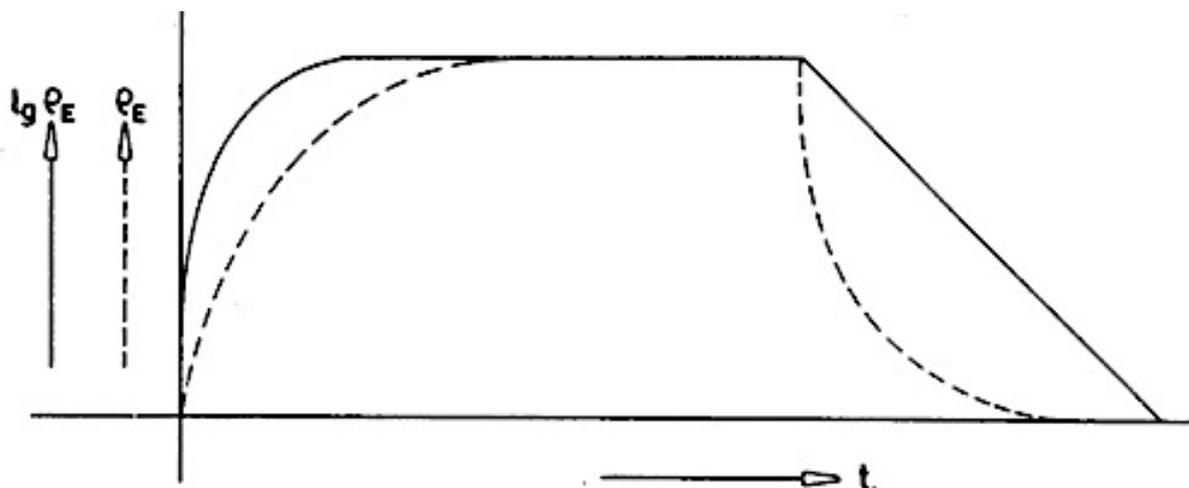


Gráfico 3-4. Procesos de ascenso y descenso de la densidad del sonido en escala lineal (a trazos) y logarítmica (continua). Fuente: Llinares, Llopis y Sancho, 2011.

El valor del tiempo de reverberación viene dado por la llamada fórmula de Sabine:

$$t_R = \frac{0,162 \cdot V}{A} = \frac{0,162 \cdot V}{\sum \alpha_i S_i} \quad [3]$$

Donde α es el coeficiente de absorción y S la superficie de cada pared.

Cabe recordar que la acústica estadística y, por tanto, el tiempo de reverberación, solo es aplicable en condiciones de campo difuso con lo que ello implica, densidad de energía y energía por unidad de superficie y tiempo que llega a cualquier superficie constante, y que la distribución del campo acústico sea uniforme.

Posteriormente se han deducido otras teorías y fórmulas sobre el tiempo de reverberación, como la Fórmula de Eyring, aplicable en recintos con superficies muy absorbentes ya que para absorciones muy pequeñas la fórmula queda igual que la de Sabine; o la Fórmula de Millington, que mejora en ciertos aspectos las de Sabine y Eyring, en las que se pueden obtener coeficientes de absorción mayores que la unidad, imposible físicamente; sin embargo tiene un inconveniente mayor, y es que si una superficie cualquiera, por pequeño que sea su tamaño, tiene como coeficiente de absorción la unidad, el tiempo de reverberación se anula.

Si se aplica que la medición del tiempo de reverberación se produce en condiciones de campo difuso, se obtiene que el tiempo de reverberación :

- No varía entre unos puntos y otros del recinto.
- Es independiente de la posición de la fuente.
- Es independiente de la forma y geometría de la sala.
- Es independiente de la situación de los materiales.

Pero, en mayor o menor grado, las condiciones hacen que se denomine campo difuso no suelen cumplirse, por lo que:

- A menor difusión, mayor diferencia se puede encontrar entre medidas reales del tiempo de reverberación en diversos puntos de la sala.
- Si los coeficientes de absorción de todos los cerramientos no son iguales, cerca de los materiales absorbentes se tendrá un tiempo de reverberación más corto, y cerca de los reflectantes más largo.
- En las proximidades de la fuente, donde predomina el campo directo, las medidas del tiempo de reverberación se ven distorsionadas, debido a la total falta de difusión.

Dependiendo del uso al que se destine un recinto y del volumen del mismo se precisa un tiempo de reverberación diferente, para obtener un campo acústico más o menos seco, mayor o menor vivacidad de la sala (adecuado tiempo de reverberación en frecuencias medias y altas), etc. (Gráfico 3-5).

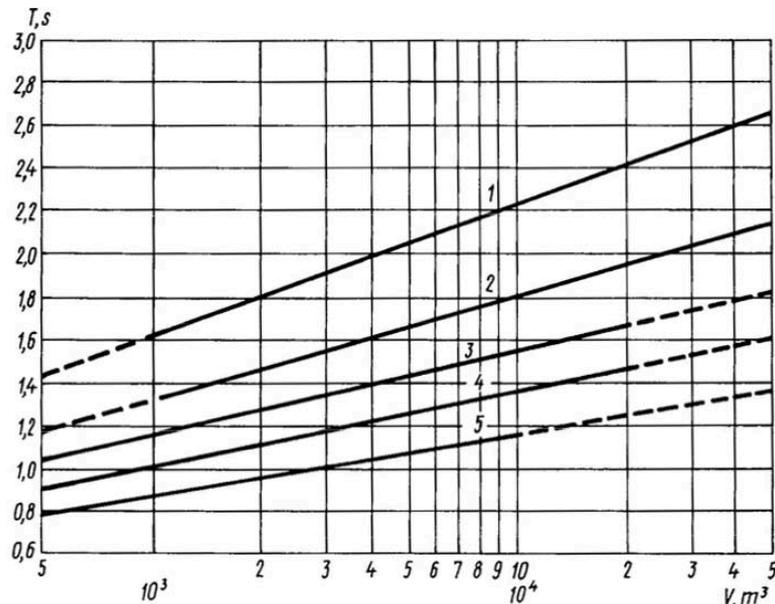


Gráfico 3-5. Tiempo de reverberación recomendado para medias frecuencias (500-1000 Hz) en función del volumen y uso de la sala. 1- Salas para la palabra y música de órgano; 2- Salas para música sinfónica; 3- Salas para música de cámara, Óperas; 4- Salas multiusos, salas para musicales y teatro de drama; 5- Auditorios de lectura, salas de conferencias, salas de cine.

3.3.2 C80

El C80 es el parámetro con que se define la claridad musical, e indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales que integran una composición musical. Indica la relación en decibelios entre la energía sonora registrada por un receptor en los primeros t ms desde la llegada del sonido directo y la que recibe a partir de ese instante. En 1975, Reichardt propuso los 80 ms como límite de perceptibilidad para la música. La fórmula con la que se obtiene el C80 es:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [4]$$

Donde $p(t)$ es la función de la respuesta impulsiva en el ambiente.

Se obtiene con la media aritmética del valor en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz. Al depender de la frecuencia, el C80 es diferente en hombres que en mujeres, por la diferente composición en frecuencias de la emisión.

El C80 depende del sonido directo, las primeras reflexiones y el campo reverberante, por lo que depende más de la posición que otros parámetros acústicos. Puesto que el oído humano percibe el sonido recibido en este periodo como un único sonido, las primeras reflexiones aumentan la claridad musical. Por el contrario, para la claridad de la palabra se utiliza el C50 puesto que, como se ha indicado, a partir de ese instante se denominaría eco y la palabra precisa de un espacio menos reverberado para su correcta comprensión.

El C80 también tiene valores aconsejables. Beranek estableció que, para una sala vacía, el C80 debía situarse entre:

$$-4 \leq C80 \leq 0dB$$

Evitando en cualquier caso obtener valores superiores a +1 dB.

Por su parte, L. G. Marshall propone un C80 en salas ocupadas entre:

$$-2 \leq C80 \leq +2 dB$$

Pero la claridad musical no solo depende de la relación energética de su definición, sino que está en relación con factores puramente musicales, como el tipo de música, los instrumentos empleados, la complejidad del pasaje y el virtuosismo en su interpretación.

3.3.3 STI

El STI (Speech Transmission Index) es un parámetro acústico que permite conocer la inteligibilidad de la palabra en un recinto. Esta comprensión depende directamente del nivel y las características del ruido de fondo, del tiempo de reverberación y otras características del recinto. Es un parámetro reciente, desarrollado a principios de 1970. Su medición es muy compleja, puesto que depende de muchos factores y utiliza un esquema de modulación de amplitud altamente complicado. Los valores del STI se indican en una escala de 0 a 1, representando el 0 un recinto totalmente ininteligible y el 1 perfectamente inteligible. Esta escala se divide en cinco escalones de inteligibilidad (Tabla 3-1).

Hay otros parámetros para representar la inteligibilidad más simplificados, como el RASTI (Rapid STI) para el cual se ha desarrollado incluso instrumentación específica.

Tabla 3-1. Tabla de valores recomendados de STI.

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

3.4 CATT Acoustic

La creación de un modelo digital para la simulación acústica de un recinto permite conocer el comportamiento de dicho recinto obteniendo resultados razonablemente próximos a los reales. Puede emplearse tanto en el proceso de proyección del recinto, como para identificar y solucionar posibles errores que se den o, como en este caso, comprender la acústica de un recinto antiguo, incluso que haya desaparecido.

En este caso el programa empleado es el CATT Acoustic v.9.0c, con licencia del Departamento de Física Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid.

3.4.1 Creación del modelo

El proceso de creación del modelo digital comienza fuera del propio programa, ya que es en AutoCAD donde hay que efectuar la importación a CATT. No necesariamente se debe realizar el modelo en AutoCAD, puede hacerse con cualquier programa de modelado tridimensional (Rhinoceros, Scketchup, 3DStudio, etc), siempre y cuando se pueda exportar ese archivo al AutoCAD para realizar la exportación a CATT.

En el modelo no pueden emplearse elementos curvos, solamente puede haber superficies planas, y debe realizarse con “Cara3D”, no con “Superficie”, “Malla” o similar, solamente admite “Cara3D”, esto supone que cada elemento no va a tener más de 4 vértices, haciendo que el número de caras se vea aumentado. Además, debe orientarse de un modo específico (Figura 3-7), en base a la situación de la emisión y su dirección.

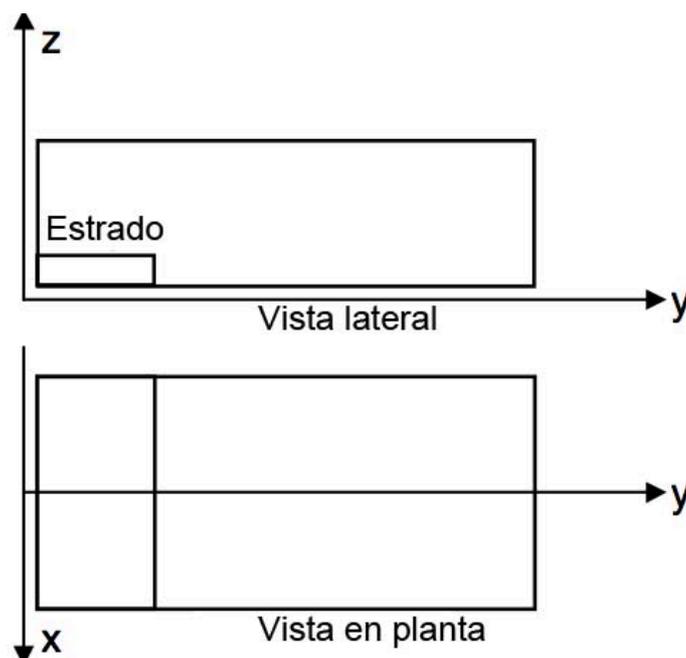


Figura 3-7. Orientación en que debe situarse el modelo. Fuente: AA. VV., 2002.

Una vez que el modelo está terminado, en AutoCAD deben cargarse una serie de aplicaciones externas que permitirán a este programa introducir los emisores, con dirección y cualidades de emisión, y receptores en sus puntos precisos, además de aportar las cualidades de material a cada elemento. Cuando todo esto está hecho, AutoCAD permite exportar tres archivos, gracias a las aplicaciones cargadas anteriormente, que son MASTER.GEO, SRC.LOC y REC.LOC. Estos archivos se corresponden con la información de las caras, las fuentes sonoras y los receptores respectivamente. Son archivos de texto que definen cada elemento a partir de sus coordenadas en el modelo. En el MASTER.GEO también se define su orientación a partir de barras inclinadas hacia un lado u otro, haciendo así que el lado con las cualidades acústicas esté en el interior de la sala y no en el exterior.

Una de las ventajas de trabajar con archivos de texto es que se pueden modificar posteriormente, pudiendo hacerlo incluso en Microsoft Word. Por ejemplo, si se cuenta con un gran número de materiales y que no se apliquen a muchas caras algunos de ellos, puede ser más sencillo introducir el material a cada plano posteriormente. Además de poder recolocar los planos que, al avanzar uno a uno en CATT, no esté cada uno muy separado del anterior y posterior. Pero la mayor utilidad es para modificar la orientación de los planos, ya que depende del sentido en que se han definido los vértices de la cara.

Este proceso supone un trabajo preciso y minucioso, en primer lugar para que los vértices de las caras coincidan y no se escapen muchos rayos, y también para identificar si cada plano está en la orientación correcta o no.

Cuando los tres archivos están correctos, en la ventana principal de CATT se indica cuál es el modelo que debe abrir (MASTER.GEO), las fuentes que actuarán (SRC.LOC) y los receptores que debe añadir (REC.LOC). Antes de realizar ninguna acción con los archivos, debe indicarse que el programa debe suponer que la estancia está cerrada, puesto que si no, el programa no realiza ninguna acción. Con esto puede comprobarse si el modelo es aceptable, observando el porcentaje de rayos que se escapan del recinto.

3.4.2 Trazado de rayos

El método por el cual lleva a cabo el trazado de rayos es mediante el método de focos imagen que se ha descrito anteriormente. Da la opción de delimitar el número de reflexiones a considerar, indicando por defecto tres reflexiones, dando la opción de considerar hasta los rayos con 9 reflexiones.

En la visualización del trazado de los rayos se muestra también el foco imagen, o los focos imagen si ha sufrido más de una reflexión (Ilustración 3-1). Esto permite apreciar a simple vista la gran distancia que recorren algunos rayos antes de llegar al receptor

(Ilustración 3-1, fila de abajo a la derecha), y explica su retardo respecto al sonido directo y la diferencia de nivel, que dependerá del comportamiento acústico de los materiales en que sufra la reflexión.

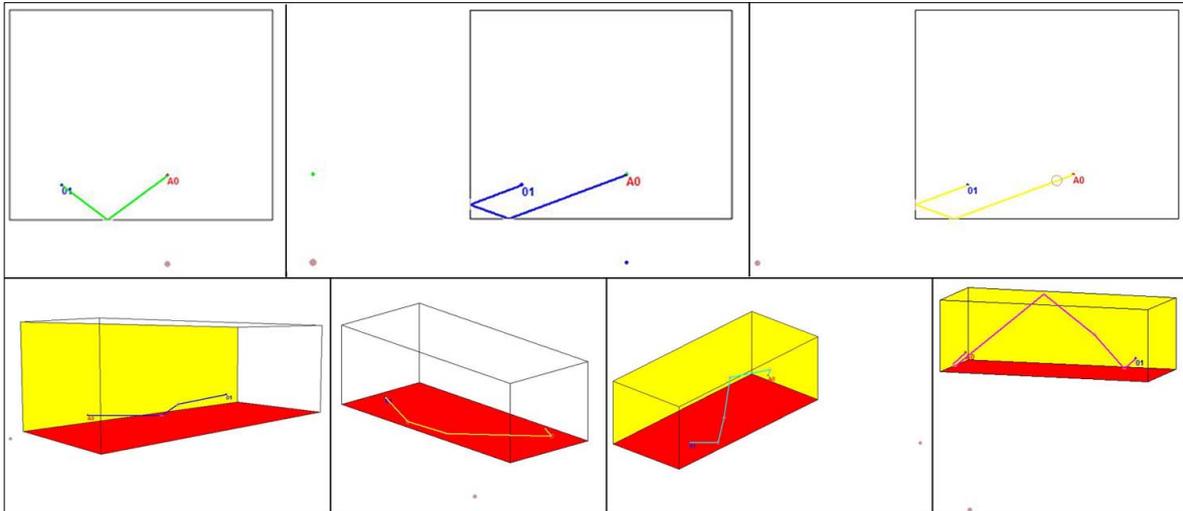


Ilustración 3-1. Capturas del trazado de rayos con los focos imagen representados.

El trazado de rayos se muestra al mismo tiempo que un ecograma (gráfico a lo largo del tiempo que muestra el instante en que se recibe cada rayo, el nivel sonoro de cada uno y las reflexiones que ha sufrido antes de llegar al receptor), por lo que se puede observar el recorrido que ha realizado ese rayo preciso, en cuánto tiempo lo ha hecho y con qué nivel sonoro ha llegado (Ilustración 3-2). Con un ecograma se puede identificar fácilmente si las reflexiones afectan o no al sonido directo, observando la diferencia de nivel con que llegan los rayos reflejados respecto al rayo directo. Además, CATT da la opción de visualizar las caras en las que ha rebotado, coloreándolas, de mostrar a la vez todos los rayos que le llegan y de mostrar todos los foco imagen que actuarían para cada receptor.

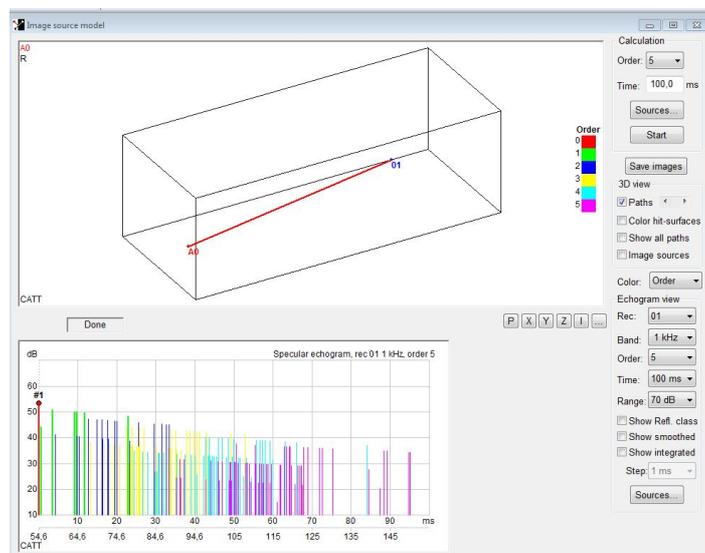


Ilustración 3-2. Captura de la ventana que muestra el trazado de rayos desde una fuente a un receptor.

3.4.3 Parámetros y herramientas

CATT Acoustics tiene un amplio abanico de parámetros que puede aportar. Alguno de ellos son el tiempo de reverberación, el nivel de presión sonora, el STI, o parámetros que indican la claridad, como C80, C50, D, etc.

Además, cuenta diferentes herramientas con las que mostrar los parámetros. Desde mapas acústicos del recinto hasta videos tridimensionales que muestran la propagación de los rayos acústicos, además de vectorgramas. En todas las opciones que aporta, se puede delimitar el orden del último rayo que considere, es decir, el número de reflexiones máximas que ha de tener un rayo para ser considerado.

Para la realización de mapas acústicos hay que definir los planos sobre los que va a realizarse la evaluación (no deben ser muy inclinados, puesto que es donde se supone que estará la audiencia), la altura sobre los mismos a la que realizarla y la dimensión de la rejilla de medición. La dimensión de esta rejilla hace que, cuanto más pequeña es, más preciso es el mapa.

Hay otro tipo de mapas acústicos que son los de emisión directa, en los que se muestra únicamente los puntos de cualquier superficie del recinto, ya sea suelo, pared o techo, a los que llega emisión directa y el nivel con que llega. Estos son útiles para delimitar la zona en la que sí que se tiene sonido directo y, por tanto, llega sin distorsión provocada por la reflexión en los paramentos.

Los vectorgramas son ecogramas tridimensionales que aportan gran información. La base es la del ecograma, pero a la información de instante y nivel de cada rayo se le añade la dirección desde la que le llega al receptor. Así se puede observar si la recepción se da en todas direcciones de forma repartida o si hay periodos en los que solo llegan reflexiones desde una parte y luego desde otra, que pueda distinguirlo el receptor. Esta herramienta no ha podido emplearse puesto que la versión del CATT Acoustic con la que se ha realizado la simulación no contaba con ella.

Por otra parte, en los videos que muestran la propagación del sonido se puede observar la propagación del sonido en todo el volumen del recinto en cada instante.

4 DESARROLLO DEL TRABAJO

Este apartado trata de explicar el proceso que se ha seguido en la elaboración de la parte acústica del trabajo, desde la realización de la planimetría y el primer guion para la realización de mediciones *in situ* hasta los resultados obtenidos en la simulación virtual. Este proceso ha tenido dificultades en el camino desde el principio, pero planteaba retos que hacían más interesante el desarrollo del mismo.

4.1 Levantamiento de Planimetría

En primer lugar se debía buscar documentación gráfica, en planta y sección, para la elaboración de la planimetría del edificio. Esta planimetría sirve tanto para la elaboración del guión para las mediciones *in situ* de acústica, como para comenzar a pensar y deducir la localización de emisores y receptores en los diferentes ritos que se realizaban en su interior.

4.1.1 Dificultades con la documentación existente

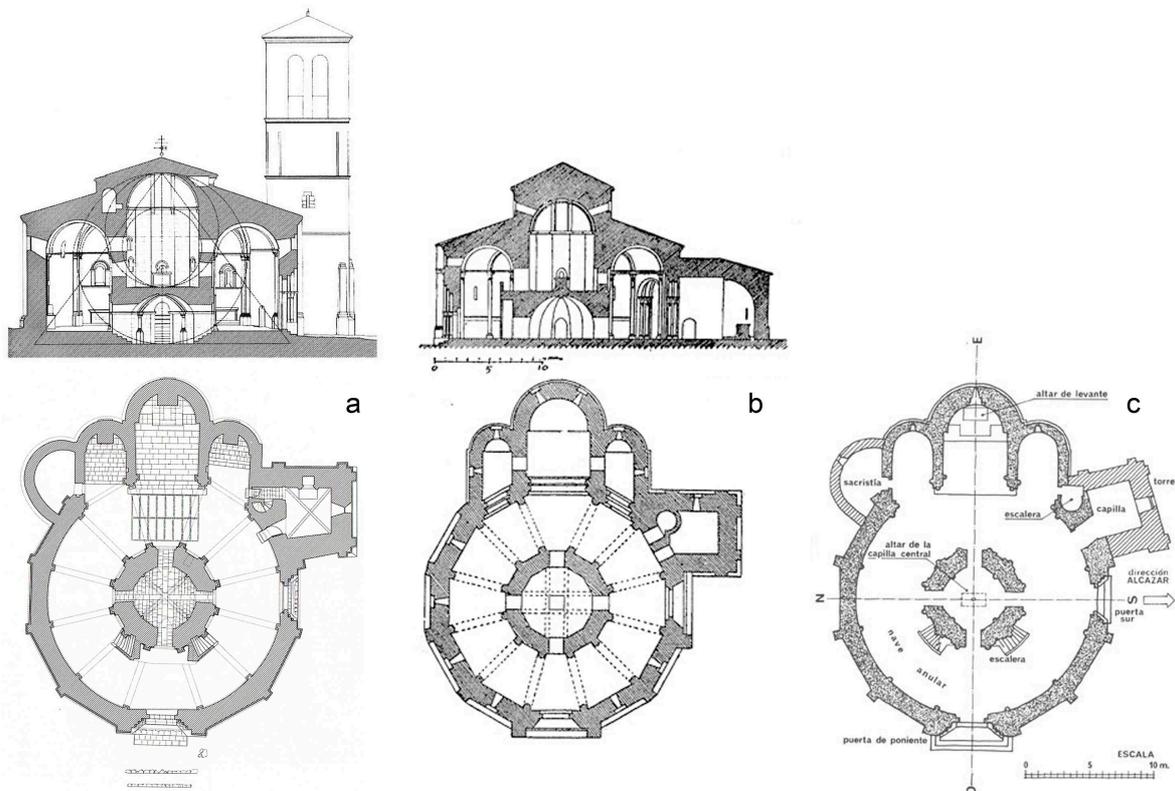


Figura 4-1. Plantas y secciones encontradas en: a) Merino de Cáceres, 1998; b) Álvarez Mora et al, 1994; c) García Atienza, 1995.

En este primer paso de todo el proceso es donde surgió el primer problema, puesto que, a pesar de que se consiguieron diversas plantas y secciones, no coincidían entre sí en diferentes aspectos, algunos no demasiado importantes como la localización de la puerta de acceso a la sacristía y la torre, la disposición de los arcos del deambulatorio o la diferencia de altura entre el la cubierta del deambulatorio y la linterna, pero otras muy importantes, como las dimensiones de la iglesia, la escala del documento, las proporciones entre planta y sección o, algo que ya se ha mencionado, el nivel más bajo de la estancia inferior del edículo central o no (Figura 4-1).

La documentación encontrada era en su mayoría antigua y realizada a mano, por lo que no era de gran precisión, además no se indicaba una escala numérica, sino que tenían escala gráfica, lo que la hacía más imprecisa aún. A esto se añade que en algún documento la escala gráfica estaba equivocada e indicaba la mitad de lo que debería representar en la realidad, o que otro documento lo indicaba en pies y su traslación a metros no coincidía tampoco con las dimensiones reales.

Finalmente se localizó un documento en el que se describían las dimensiones principales, tanto exterior como interiormente, como la longitud total de la iglesia, las profundidades de los ábsides o las alturas en diferentes puntos de la iglesia (Figura 4-2). Estas dimensiones, indicadas en forma de texto, coincidían con la representada gráficamente, contando con un indicador de escala gráfica correcto en este caso.

Dimensiones

Exteriores	
Altura de los muros	
Altura del ábside principal	8,15 m.
Altura del ábside lateral del evangelio	7,10 m.
Altura del ábside lateral de la epístola	7,40 m.
Portada occidental	
Altura de la arquivolta exterior	5,70 m.
Altura del arco de entrada	2,10 m.
Anchura desde las columnas exteriores	4 m.
Anchura del arco de entrada	1,95 m.
Portada lateral Sur	
Altura de la arquivolta exterior	5,60 m.
Altura del arco de entrada	3,85 m.
Anchura desde las columnas exteriores	3,57 m.
Anchura del arco de entrada	1,87 m.
Interiores	
Longitud total de la iglesia	25,35 m.
Profundidad del ábside central	6,50 m.
Profundidad de los laterales	3,95 m.
Anchura de la nave circundante	5,35 m.
Anchura del edículo interior, incluidos los muros	7,60 m.
Anchura del ábside central	6,50 m.
Anchura de los laterales	3,30 m.
Altura de la nave circundante	8,55 m.
Altura del ábside central	7,95 m.
Altura de los ábsides laterales	7,75 m.

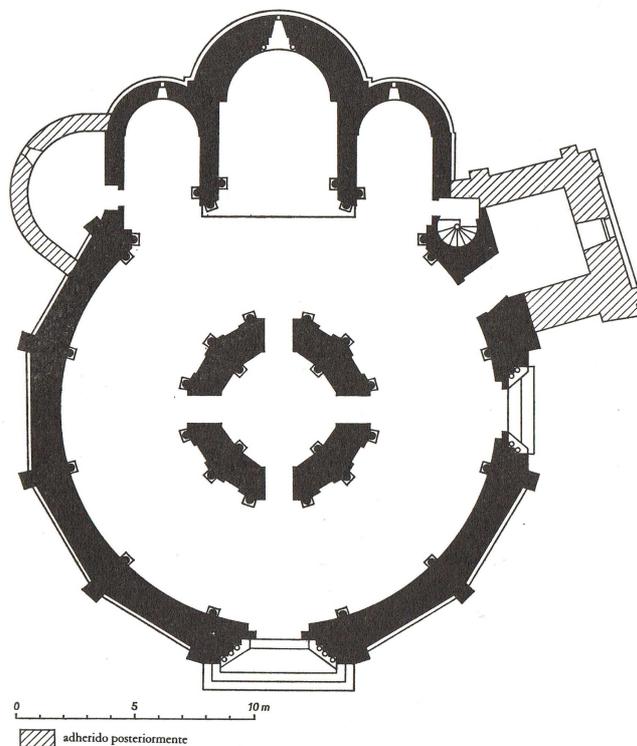


Figura 4-2. Dimensiones y planta tomadas como base. Fuente: De Lojendio y Rodríguez, 1985.

4.1.2 Elaboración de planimetría propia

Finalmente, en la primera visita a la iglesia se realizaron diversas mediciones que verificaron las dimensiones indicadas por De Lojendio y Rodríguez. Estas mediciones *in situ* incluyeron entre otros aspectos las puertas cegadas que se presentan en todos los lados del dodecágono del edículo central, en sus dos alturas, siendo además, las de la segunda planta de mayor altura.

Otra de las mediciones que hubo que verificar fue la de los accesos a la estancia inferior del edículo central, iguales dos a dos tanto en altura como en anchura, siendo más altas y anchas las que se abren a este y oeste. Además de las ventanas de la estancia superior del edículo central que se comunican con el deambulatorio, las dos que se abren a norte y sur que son extremadamente abocinadas, y las ocho colocadas asimétricamente a mayor altura y que desembocan ya en la bóveda de cañón.

Debido a la doble altura del edículo central, se realizaron dos plantas y una sección longitudinal. En la planta principal (Figura 4-3) se representan las medidas más importantes, que verifican las relaciones indicadas por Merino de Cáceres, además de los diferentes materiales que componen el solado de la iglesia. Es necesario diferenciarlos debido a sus diferentes características acústicas que tienen influencia en la propagación del sonido, siendo más o menos reflectores o absorbentes. Además se representan los muros que se mantienen actualmente que pudieron albergar en su interior una cripta, y las fosas de antiguos enterramientos, realizadas en las rocas de granito que a su vez sirven de apoyo sólido para los muros de la iglesia. Observándolos en planta, se deduce que bajo la sacristía hay más fosas y que todo ese lado norte, pero oculto del camino, sirviera de lugar para llevar a cabo los enterramientos de miembros ordinarios. En el interior, en el deambulatorio frente al altar también hay una serie de lápidas, se supone que miembros destacados de las órdenes que pasaron por la iglesia, tanto por su localización como por las inscripciones de las mismas, actualmente ilegibles.

En el Anexo VI se encuentra la planimetría completa, las dos plantas y la sección.

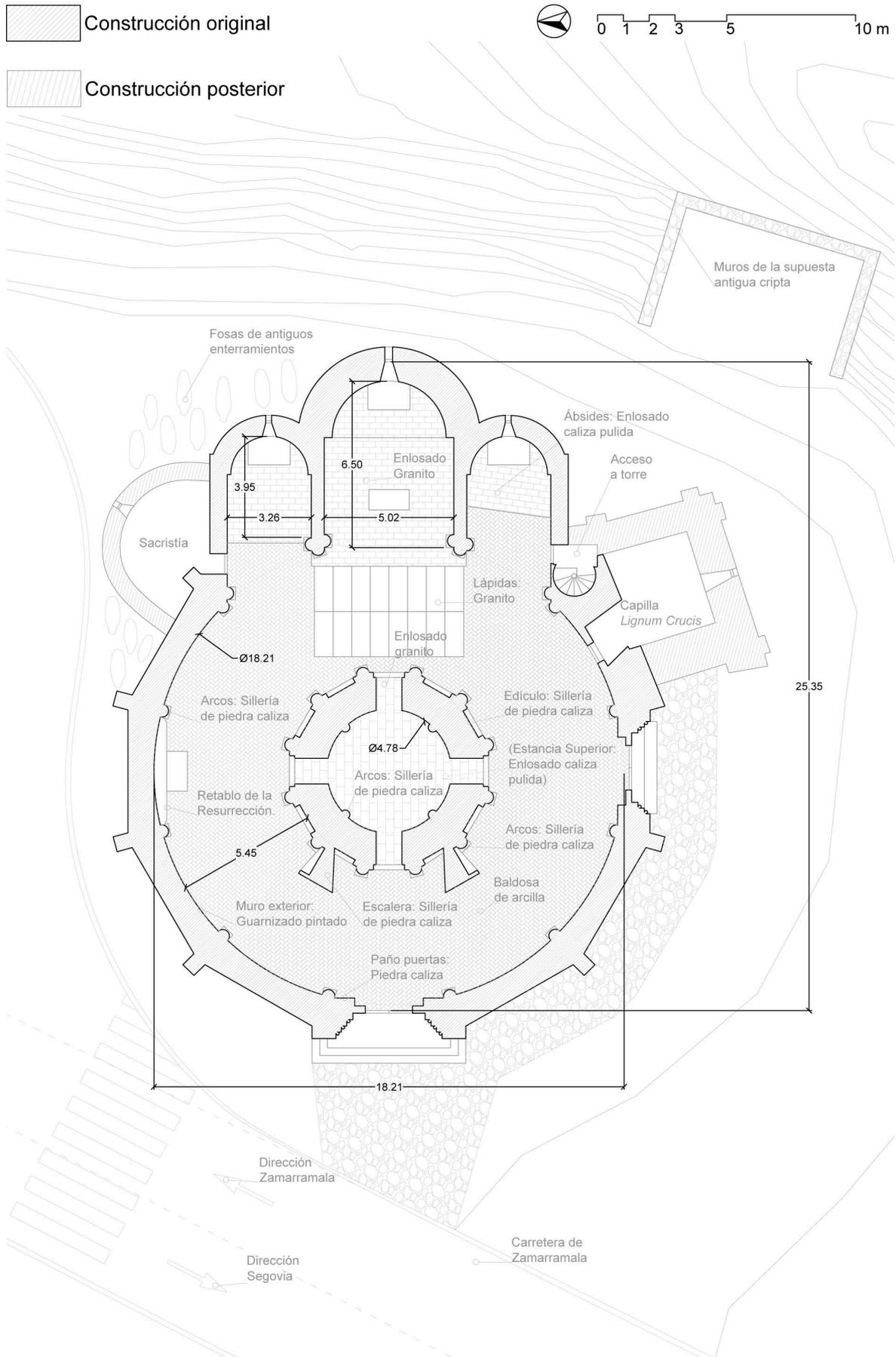


Figura 4-3. Plano acotado de la planta principal, con los materiales y elementos significativos.

4.1.3 Materiales

Los materiales y su localización son:

- Piedra vista:
 - Muro del edículo central, ambas caras.
 - Arcos fajones del deambulatorio y de las dos cúpulas del edículo central.
 - Lienzos del muro exterior que albergan las dos portadas.
- Granito:
 - Suelo del altar principal
 - Suelo de la sección del deambulatorio este, frente al altar principal.
 - Suelo de la estancia inferior del deambulatorio y los accesos a la misma.
- Baldosa cerámica:
 - Suelo del deambulatorio
- Guarnecido:
 - Cara interior del muro exterior, tanto en deambulatorio como en ábsides.
 - Bóvedas, ábsides y cúpulas.
- Madera:
 - Puertas.
 - Retablo de la pared norte.
 - Asientos, tanto en el deambulatorio como en el ábside central.
 - Barandilla del descansillo de la escalera.



Ilustración 4-1. Retablo de la Resurrección, ubicado en el lienzo norte. Fotografía propia.

4.1.4 Volumetría

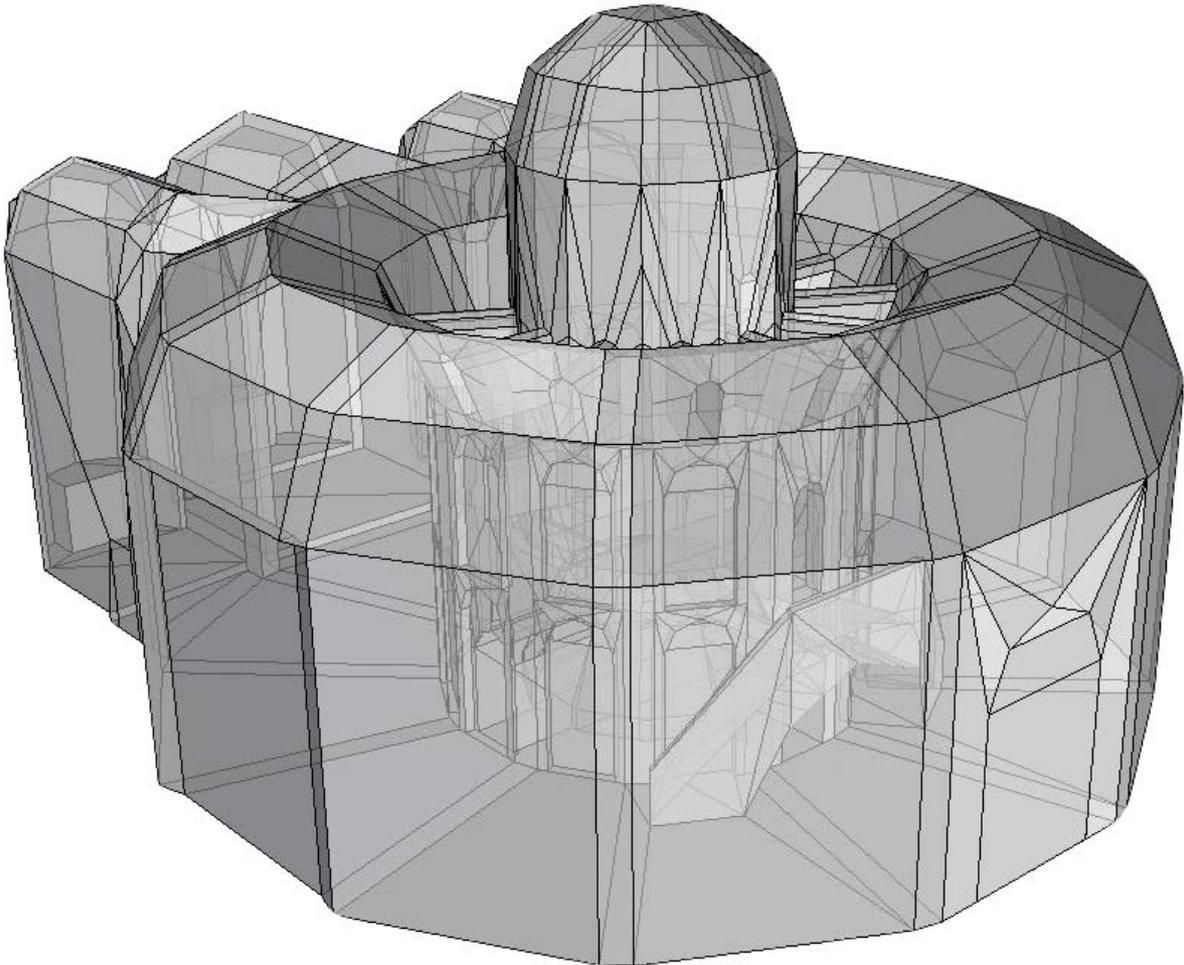


Figura 4-4. Modelo completo final.

El modelo tridimensional (Figura 4-4) se realizó con Rhinoceros, un programa de modelado digital que tiene gran potencial en el trabajo con NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Este programa se conocía con anterioridad y se tenía gran facilidad de trabajo con él, más que con AutoCAD 3D.

Como se ha mencionado, no se emplearon curvas en su modelado, sino que las bóvedas y las cúpulas se descompusieron, dividiendo una circunferencia en dieciséis lados, número que se redujo para optimizar el modelo y reducir su número de caras.

A pesar del gran conocimiento previo del programa, la elaboración de este modelo llevó un tiempo considerable puesto que la geometría de la iglesia tiene gran complejidad. Inicialmente, esta complejidad se localizaba en dos puntos de la iglesia: la conexión de los ábsides con el deambulatorio y la escalera que da acceso a la estancia superior del edículo central.



Ilustración 4-2. Secciones de la bóveda del deambulatorio a las que se adosan los ábsides.

En la visita *in situ* se identificaron como principal problema las secciones de la bóveda del deambulatorio en que se enlazaban los tres ábsides y la conexión de estas con los tres arcos que las delimitaban: dos arcos del deambulatorio y otro delimitando el acceso a los ábsides (Ilustración 4-2). El problema radicaba en la doble curvatura de estas, ya que siguen la bóveda de cañón del deambulatorio pero también la de los ábsides. La dirección del ábside principal es ortogonal a la del deambulatorio, pero la de los laterales no.

Finalmente el problema sí que estuvo en este punto, pero no en la sección de bóveda, sino en los nervios. Dado que la geometría necesitaba de un gran número de planos, donde se pudiera se debía optimizar el número de planos empleados, por lo que hubo que replantear la ubicación y orientación de los nervios para que no quedara entre ellos ningún espacio y que la bóveda acabara con precisión en cuatro esquinas. Esto precisó una remodelación completa de la zona (Figura 4-5).

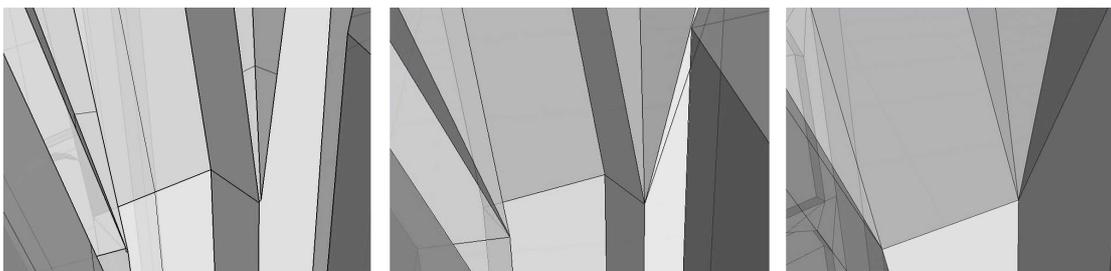


Figura 4-5. Detalle de la unión de los arcos en los ábsides: primera versión, imprecisa; segunda versión, precisa; tercera versión, nervio representado con un plano.

En cuanto a la escalera de acceso a la estancia superior del edículo central el problema no se consideró en la visita, puesto que, en principio, la escalera debía representarse como un plano inclinado. Pues bien, esto no fue posible por la disposición de la escalera a lo largo de tres de los lienzos del edículo central, incluyendo además columnas y puertas cegadas, como se ha comentado previamente. Además, la dirección del arranque de la escalera con la de terminación en el descansillo superior tampoco coinciden, por lo que se tuvo que realizar en dos tramos, que posteriormente tuvieron que triangularse.

Pero este no era el único problema que proporcionaba la escalera, sino que el arco sobre el que descansa también tuvo cierta complejidad. La primera vez que se realizó, al ser el arco una extrusión paralela, se intersecaba con el primer tramo de la escalera, por lo que hubo que replantear tanto la dimensión del arco, que permitiera albergar en su interior la altura de la puerta de acceso a la estancia inferior, como la pendiente de este tramo, lo que supuso el replanteo de toda la escalera.

Una vez el modelo estuvo terminado, se observó que contaba con una gran cantidad de superficies, superior a 1800 caras. En principio no se tomó como un problema, y fue cuando se intentó exportar el modelo a AutoCAD y a CATT cuando se identificó como un gran problema, el mayor de todos. Y es que el modelo estaba construido con Superficies, mientras que CATT solo trabaja con "Cara3D". Esto a priori puede no significar un problema, pero lo es puesto que las "Superficies" en Rhinoceros pueden tener infinito número de lados y vértices, mientras que las "Cara3D" solo pueden tener un máximo de cuatro vértices. Y el mayor problema lo constituía el suelo, lo que con "Superficies" significaba una sola, con "Cara3D" había que triangularlo en su totalidad, lo que incrementaba excesivamente el número de caras. Pero no solo el suelo, todas las "Superficies" que representaban el muro del edículo central hubo que triangularlas, aumentando también el número de "Caras3D" en estos planos. Así pues, hubo que replantear todas las bóvedas, cúpulas y nervios, reduciendo la circunferencia a un octógono, así como el suelo y el muro del edículo central, tanto la parte que da al interior como la que da al deambulatorio (Figura 4-6).

Como se seguían obteniendo un gran número de caras, cerca de 1600 en la segunda versión, se realizó una tercera versión del modelo hasta reducirlo a alrededor de 1250 caras, modificando trazado de bóvedas, cúpulas y nervios, que sería lo más beneficioso, porque además de reducir a la tercera parte el número de caras de estos, reducía considerablemente las caras que conformaban el suelo.

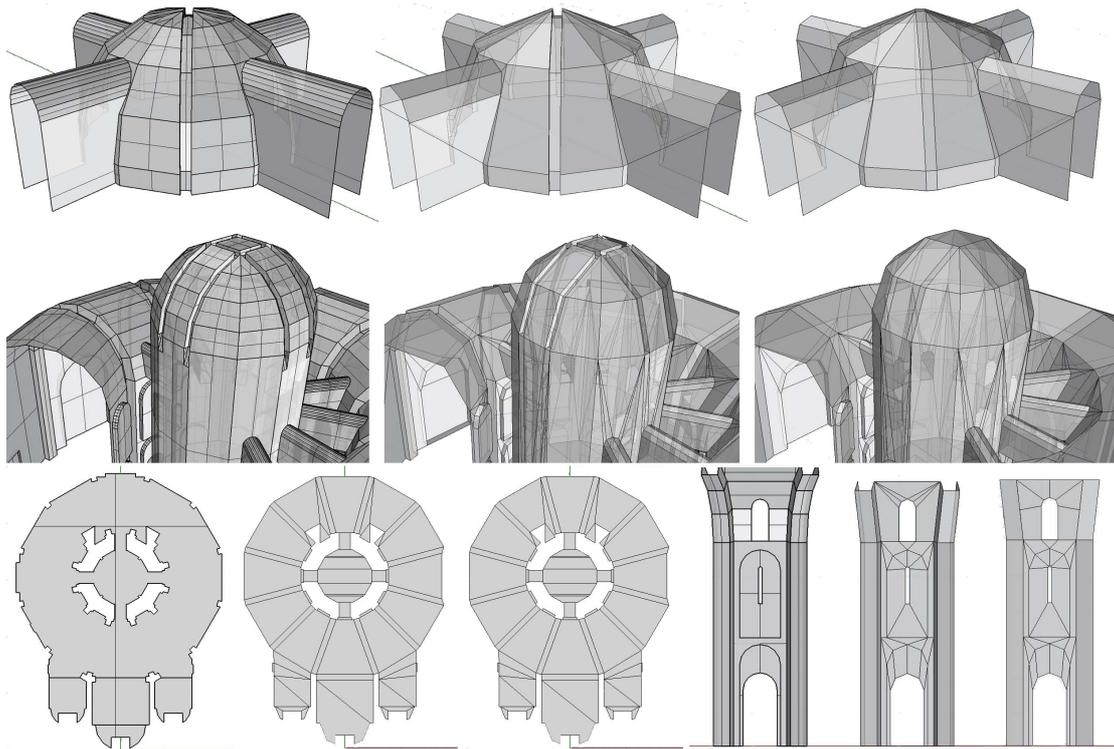


Figura 4-6. Capturas de las tres versiones de diferentes puntos del modelo: cúpula inferior, cúpula superior y deambulatorio, suelo y un segmento del muro que conforma el edículo central.

4.2 Toma de datos acústicos

El fin con que se realizaron mediciones *in situ* fue el de obtener los resultados para ajustar el modelo digital a su comportamiento en la realidad y así obtener una simulación más correcta y acorde a su funcionamiento acústico real. Este punto no estuvo exento de dificultades. Se realizó una visita a la iglesia con el fin de conocer a quién pertenecía la iglesia y por tanto a quién había que pedir permiso para realizar la medición acústica. El bedel informó de que la iglesia pertenece a la Soberana Orden Militar y Hospitalaria de San Juan de Jerusalén de Rodas y de Malta y son ellos quien deben dar el permiso.

En la primera puesta en contacto se explica el proceso que se sigue en el ensayo, la generación de ruido tanto con fuente eléctrica como ruido impulsivo por diferentes métodos que no suponían riesgo para la iglesia, y el tiempo estimado que llevará realizarlo y se obtiene el permiso a falta de confirmar el día en que se realizará. Sin embargo, cuando se informó del día, que se volvió a explicar el proceso y el tiempo que se necesitaba, se obtuvo respuesta negativa, justificando que la iglesia no podía permanecer cerrada al público tanto tiempo y que no se nos daba permiso para realizar el ruido impulsivo, hasta el punto de no permitir el acceso. Posteriormente, el tutor se puso en contacto otra vez, esta vez de forma oficial, con la Orden de Malta, obteniendo, finalmente, el permiso necesario.



Ilustración 4-1. Fotografías del proceso de medición. Fotografías propias.

4.2.1 Guion

Para la realización de la toma de datos acústicos *in situ* se realizaron guiones tanto para la medición de la distribución de niveles como para el tiempo de reverberación, que una vez realizando las mediciones se debieron modificar. Estos guiones se representaron tanto en planta como en sección.

Se había establecido una posición de medición en la nave, que simulara la oración de los caballeros alrededor del deambulatorio, pero una única fuente no puede simular ni aproximarse a la emisión de un gran número de personas en todo el perímetro del deambulatorio. Finalmente se eliminó, quedando solo como posiciones de emisión una en el altar y otra en la estancia superior del edículo central, en el hueco que se asoma al altar principal, al suponer que serviría de lugar desde el cual se dirigía la celebración. Este punto de emisión se cambia en el modelo de simulación y se desplaza hacia dentro de la estancia, tras el altar, al comprobar en la contextualización previa que sí que se realizaban ciertos actos sobre dicho altar.

Se incluyeron posiciones de medida en la mitad de la iglesia más alejada de la carretera, asumiendo la simetría acústica de la iglesia, para que el paso de vehículos afectara lo menos posible, teniendo en cuenta que iban a afectar por la imposibilidad de aislar el interior de la iglesia.

Dichas posiciones de medida se repartieron en toda la superficie para poder observar la variación de los resultados conforme se avanza por el deambulatorio, en los ábsides laterales y en las dos estancias del edículo central.

Los planos con los guiones se muestran al final del documento, en el Anexo VII.

4.2.2 Medición

Tras la realización de los guiones y una vez dentro de la iglesia, se establecieron con precisión las posiciones. Se empleó una fuente eléctrica dodecaédrica omnidireccional y un sonómetro analizador 01 dB Metravig SO-LO Blue, midiendo con ponderación A, el cual se calibró antes y después de la medición (Ilustración 4-2, derecha). Entre la calibración previa y la posterior no se obtuvo más de 0,5 dB de diferencia, por lo que las medidas realizadas se dieron por buenas.



Ilustración 4-2. Fuente dodecaédrica y calibración del sonómetro previa a la medición. Fotografías propias.

La altura del centro de la fuente se situaba a 1,55 metros del nivel del suelo (Ilustración 4-3), y la del sonómetro a 1,60 metros, siempre a la misma distancia de quien lo manejaba.

La emisión de la fuente se realizó con ruido rosa en la función de nivel de emisión *0dB*, es decir, el nivel máximo que es capaz de emitir dentro de su calibración sin emitir un sonido distorsionado. Para las mediciones de la distribución de niveles se estableció un tiempo de medida de 10 segundos, midiendo siempre tras comprobar que el sonido se hubiera estabilizado en la iglesia.

Mientras que las mediciones de tiempo de reverberación se realizaron apagando la emisión, con la fuente en el mismo modo, y midiendo el T30, aunque se probó previamente con ruido impulsivo. En este caso solo se pudieron realizar seis mediciones.



Ilustración 4-3. Fuente en las dos posiciones: izquierda, posición F1; derecha, posición F2. Fotografías propias.

Así pues, había dos posiciones de fuente:

- F1: altar del ábside central.
- F2: altar de la estancia superior del edículo central.

Y diez posiciones de recepción:

- S1: ábside central, detrás de la fuente.
- S2: deambulatorio, centro del sector este, frente al ábside central.
- S3: ábside norte.
- S4: deambulatorio, centro del 2º sector, comenzando desde el sector este, avanzando en sentido anti horario.
- S5: deambulatorio, centro del 4º sector, comenzando desde el sector este, avanzando en sentido anti horario.
- S6: deambulatorio, centro del sector oeste, en el lado opuesto al altar.
- S7: estancia inferior edículo central, en el centro.
- S8: estancia inferior edículo central, a 1 metro del pilar suroeste, hacia el centro de la estancia.
- S9: estancia superior edículo central, en el centro.
- S10: estancia superior edículo central, a 1 metro de la arista suroeste, hacia el centro de la estancia.

4.2.3 Dificultades en la medición

En el momento de la medición propiamente dicho, también surgieron algunas complicaciones. Por ejemplo, puesto que la iglesia no se cerró al público, hubo que detener el ensayo durante aproximadamente media hora porque había una visita muy numerosa, mientras que, en otro momento, algunas personas que iban sin guía aceptaron tener que soportar el fuerte sonido de la fuente emitiendo.

El ruido de fondo también fue un problema, puesto que las puertas estaban abiertas y hay una carretera que pasa muy cerca, por lo que fue imposible reducir el ruido de fondo y hubo que medir cuando se observaba que no pasaba ningún vehículo.

Otro de los problemas surgió al medir el tiempo de reverberación. Al ser un volumen tan complejo geométricamente tenía un tiempo de reverberación que se identificaba que era alto sin necesidad de instrumentación. Esto supone un gran espacio en la memoria del sonómetro, por lo que solo se pudieron realizar mediciones en seis puntos y una sola posición de emisión. Además, se comenzó creando sonido mediante la explosión de globos de gran tamaño, 1,2 metros de diámetro (Ilustración 4-4). Se apreció que el sonido provocado era excesivamente grave, y se comprobó al observar el resultado de las mediciones que no mostraban una caída del sonido limpia que pudiera ser aceptable. Por lo que se intentó con otros globos de tamaño normal. Estos daban mejor resultado, pero al medir en el ábside norte el sonómetro no identificaba la explosión, se quedaba esperando, y no realizaba la medida.



Ilustración 4-4. Globos grandes para medición del tiempo de reverberación. Fotografía propia.

Finalmente, hubo que optar por realizar la medición apagando la fuente omnidireccional. La fuente estaba situada en la posición F1, en el altar del ábside central, y las posiciones de medida fueron desde S1 hasta S6, puesto que con este método sí que se obtenía respuesta midiendo en el ábside norte.

4.3 Resultados de la medición *in situ*

Como se ha indicado al inicio de este apartado, los resultados obtenidos en la medición se van a emplear para adecuar el comportamiento del modelo digital al comportamiento actual de la iglesia, ajustando los valores de absorción y reflexión o difusión de los distintos materiales.

Antes de comenzar el trabajo acústico con el modelo, se observan los resultados obtenidos y se aprecian algunos aspectos importantes. El nivel equivalente obtenido es muy homogéneo en el deambulatorio, no habiendo diferencias de más de 3 dBA entre una posición de medida y otra, incluso con distinta posición de fuente (Gráfico 4-1).

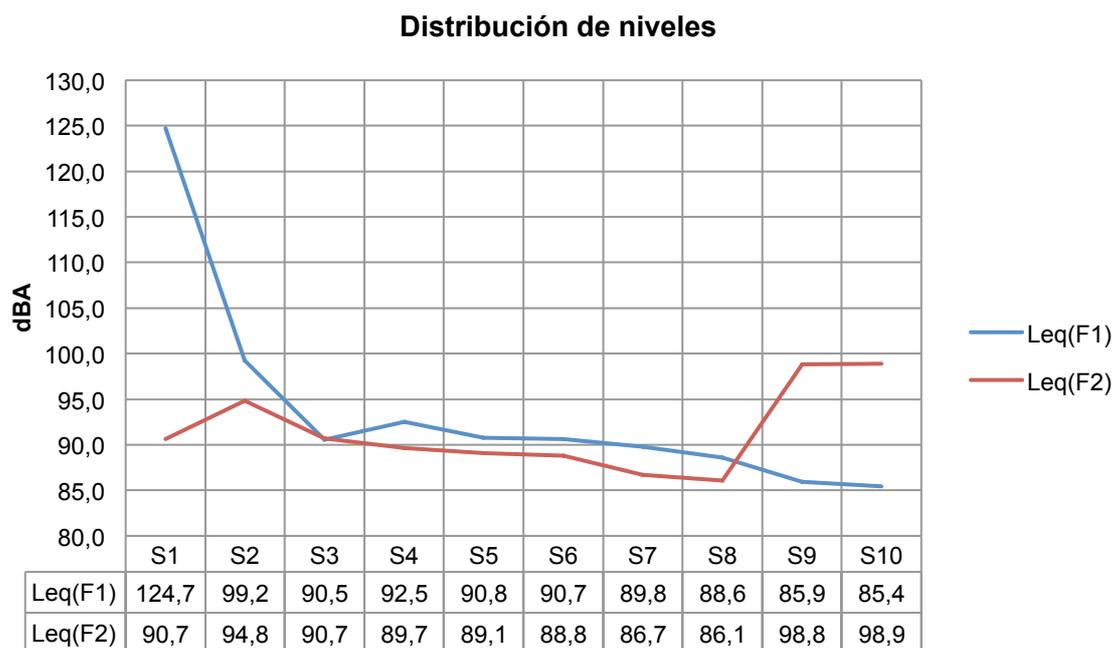


Gráfico 4-1. Comparación de nivel equivalente, en dBA, obtenido en cada punto para cada posición de fuente.

Como se aprecia en el Gráfico 4-1, el nivel obtenido es muy homogéneo, habiendo grandes desviaciones solo en las posiciones de medida muy cercanas a la fuente: S1 y S2 para la posición de fuente F1; y S2, S9 y S10 para la posición de fuente F2, sin ser estas tan altas como las anteriores. Ni siquiera los resultados midiendo en la estancia inferior del edículo central estando la fuente en la estancia superior tienen una diferencia de más de 3 dBA con los resultados obtenidos en el deambulatorio o en el mismo punto pero con la fuente en el ábside principal.

Si en vez de observar el nivel equivalente observamos la distribución de niveles por frecuencias, se observa en ambos casos una sorprendente igualdad en las curvas en cada una de las posiciones de fuente. Solo destaca la posición de medida S1 para la fuente F1 (Gráfico 4-2), que es la recepción en el ábside principal con la fuente muy próxima, por eso destaca tanto la frecuencia de 1000 Hz y es la que marca el nivel equivalente. Para esta misma posición de fuente, también se aleja ligeramente la posición S2, delante del ábside donde se ubica la fuente, pero manteniendo la tendencia general.

Por su parte, para la posición de fuente F2 (Gráfico 4-3) todas siguen la misma tendencia y en un intervalo de niveles muy próximo, con diferencias de no más de 10 dBA. Teniendo en cuenta las características físicas de la estancia, es sorprendente que se obtenga una recepción tan homogénea en todas las posiciones.

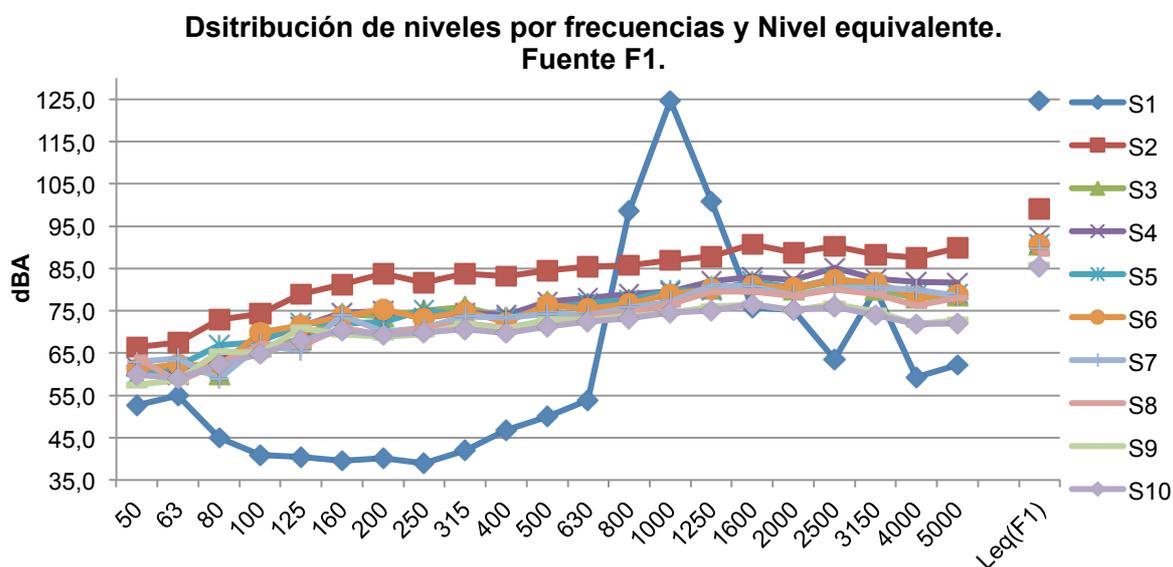


Gráfico 4-2. Distribución de niveles por frecuencias en todas las posiciones de recepción con la fuente en F1.

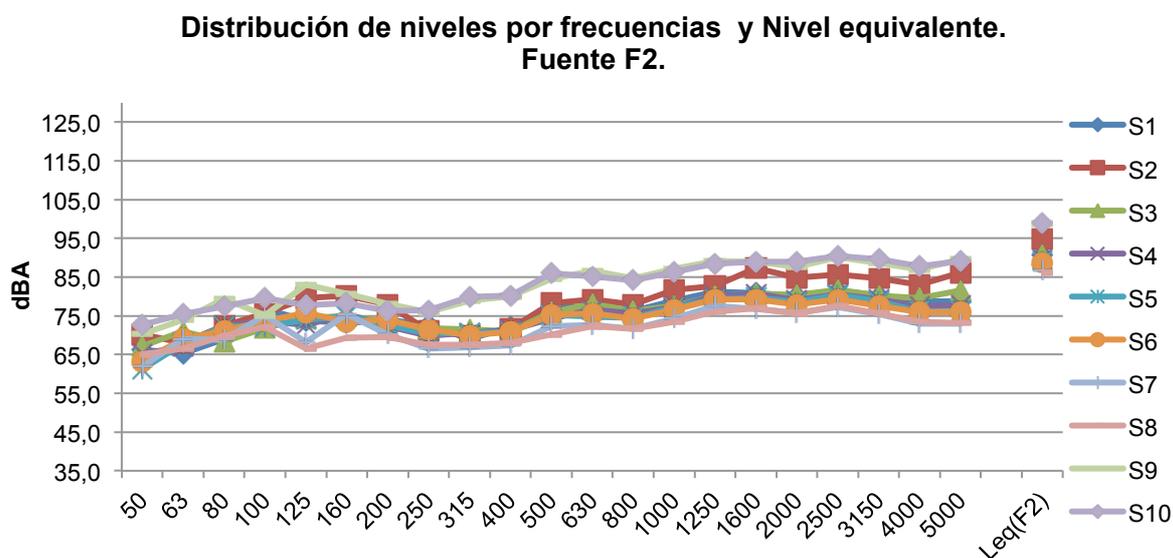


Gráfico 4-3. Distribución de niveles por frecuencias en todas las posiciones de recepción con la fuente F2.

Estos gráficos por frecuencias indican que la propagación del sonido en el recinto es muy homogéneo y que no se ve alterado por la absorción que sufra en las reflexiones, ni siquiera la geometría tan compleja provoca una propagación desigual para cada una de las frecuencias.

Se empieza a deducir, pues, que para cualquiera de las dos posiciones de emisor que se suponen eran las principales, el receptor iba a obtener un sonido muy similar fuera cual fuere su posición en la iglesia, ya fuera ábsides, deambulatorio o edículo central.

En cuanto al tiempo de reverberación, se obtuvieron inicialmente resultados que se descartaron al no concordar con lo que se apreciaba simplemente escuchando. Estas medidas fueron las que se realizaron con los globos grandes, no superaban el segundo en ningún momento y en diversos puntos de medición no se obtenían resultados (Gráfico 4-4)

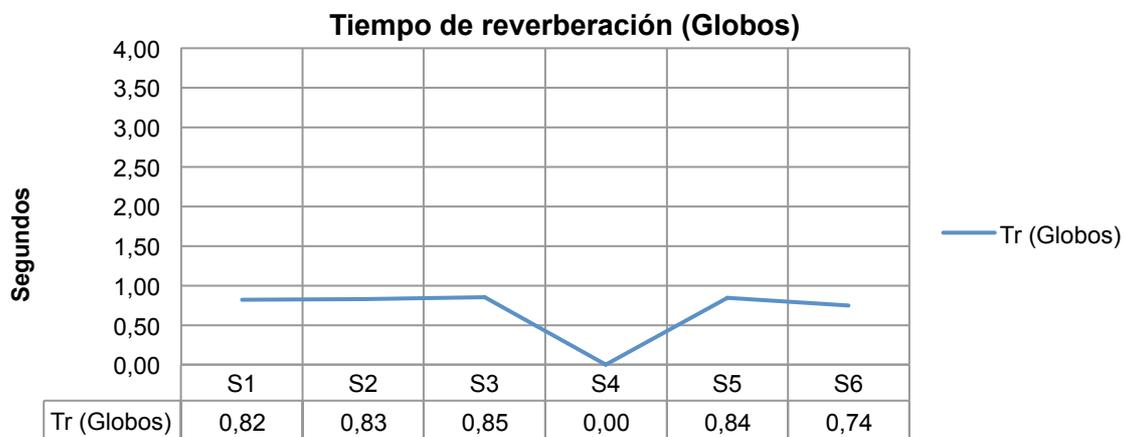


Gráfico 4-4. Tiempo de reverberación obtenido mediante la explosión de globos grandes.

Cuando se realizó la primera medida mediante la interrupción de la fuente se comprobó que, efectivamente, no se obtenía un tiempo de reverberación inferior a un segundo, sino que estaba entorno a los 3 segundos. Estos resultados se obtuvieron con la fuente en el ábside principal, F1.

En la posición S3 se obtiene un tiempo de reverberación medio segundo más alto que en las demás posiciones, incluso un segundo más alto respecto al obtenido en el altar principal (Gráfico 4-5). Al observar los resultados por frecuencias (Anexo IV), se aprecia que en la frecuencia de 500 Hz se obtiene un tiempo de reverberación superior al obtenido en otros puntos. Y se observan otros aspectos interesantes, aunque no afectan al valor del tiempo de reverberación, al obtenerse con la media aritmética de los valores en las frecuencias de 500, 1.000 y 2.000 Hz. El tiempo de reverberación obtenido en la frecuencia de 200 Hz es de 13 segundos. La frecuencia de 200 Hz tiene una longitud de onda de 4,2 metros, igual que el fondo de los ábsides laterales, quedando la onda en estado estacionario. Además, en esta posición no se obtiene valor para las frecuencias de 63, 83 y 100 Hz.

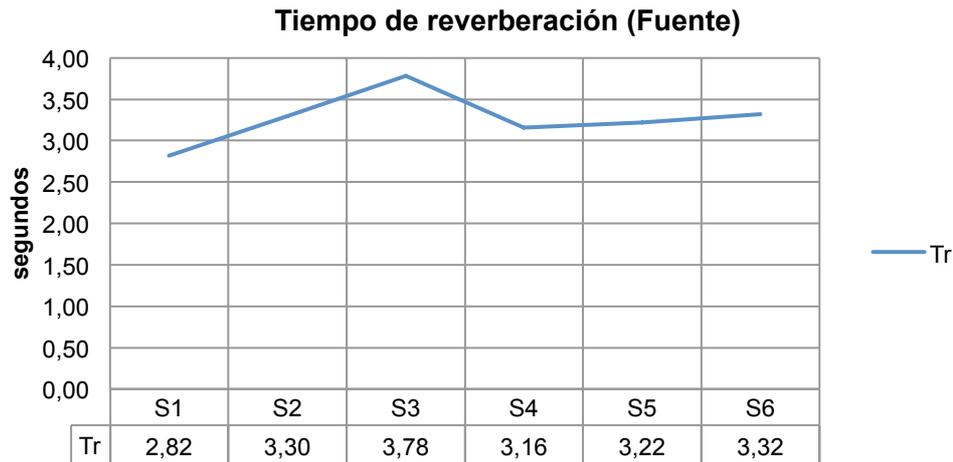


Gráfico 4-5. Tiempo de reverberación obtenido mediante la interrupción de emisión de sonido.

4.4 Modelo digital

Como ya se ha indicado, la importación se realiza desde AutoCAD, y en este caso, debido al elevado número de caras y la complejidad de la geometría del modelo, hubo que hacer dos archivos distintos con la mitad del modelo en cada uno, con lo que ello conlleva, dos planos identificados con el número '1', dos vértices identificados con el número '1'. Así pues, hubo que renombrar la mitad de los planos, la mitad de los vértices y hacer corresponder el nuevo número de vértice para que definiera cada plano. Posteriormente hubo que orientar correctamente cada plano, para que la cara que reproduce las condiciones acústicas. Tras haber orientado los planos que estaban en posición incorrecta, se comprobó que el modelo era correcto, ya que solo se salía el 0,2% de los rayos emitidos (Figura 4-7).

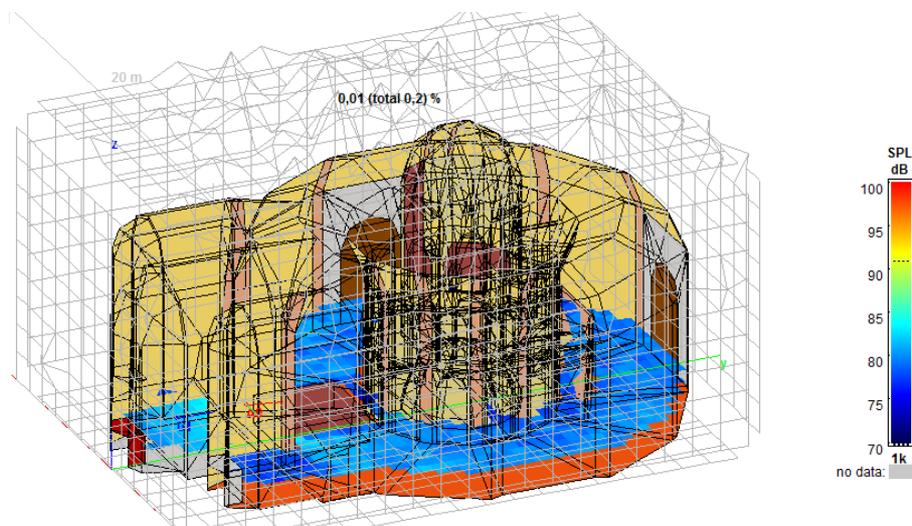


Figura 4-7. Modelo digital en CATT Acoustic, indicando el porcentaje de rayos que salen del recinto.

Tras esto, y para tener un archivo con cierto orden para introducir los materiales, se ordenaron los planos por materiales y por su ubicación, debiendo re-numerar otra vez todos los planos. Esto ayudó posteriormente a la hora de identificar los planos sobre los que realizar el mapa acústico. Una vez que el modelo estuvo organizado y con una pérdida de rayos aceptable, se procedió a ajustar el comportamiento del modelo digital con los resultados obtenidos en las mediciones *in situ*.

4.4.1 Ajuste del modelo digital

El ajuste del modelo se realizó en base al tiempo de reverberación medido, con la fuente empleada, que era omnidireccional. CATT Acoustic ofrece la posibilidad de introducir un tiempo de reverberación de referencia para compararlo con el tiempo de reverberación obtenido por el modelo. Las frecuencias que se deben introducir son 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000 Hz. Estas dos últimas no se tenían, por lo que se dejaron en el valor por defecto que aporta el programa. Así pues, puesto que hay que introducir el tiempo de reverberación por frecuencias, se hizo la media de tiempo de reverberación de las frecuencias mencionadas y para obtener un valor único, se hizo la media de las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz, como es habitual (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Tiempo de reverberación medio medido utilizado de referencia en CATT.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN REFERENCIA							
SONOMETRO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	TR MEDIO
Id	44	42	46	48	50	52	
125	2,18	3,20	3,00	5,02	4,58	0,04	3,00
250	3,00	3,48	3,52	4,47	3,57	6,25	4,05
500	3,10	3,98	5,79	3,53	3,79	3,83	4,00
1000	2,86	3,28	2,94	3,41	3,32	3,57	3,23
2000	2,50	2,63	2,62	2,52	2,54	2,57	2,56
4000	1,52	1,75	1,70	1,72	1,67	1,62	1,66
Tr	2,82	3,30	3,78	3,16	3,22	3,32	3,26

Estos valores obtenidos se introdujeron en el programa (Figura 4-5) y se comenzó a trabajar con los materiales, sus valores de absorción y difusión. Los materiales se escogieron más en base a la descripción de los mismos que a su nombre, por la semejanza del acabado descrito. Hubo que realizar alguna variación en determinadas frecuencias de algún material que se desviaba en exceso del tiempo de reverberación medido, hasta que se obtuvo un gráfico ajustado (Ilustración 4-6).

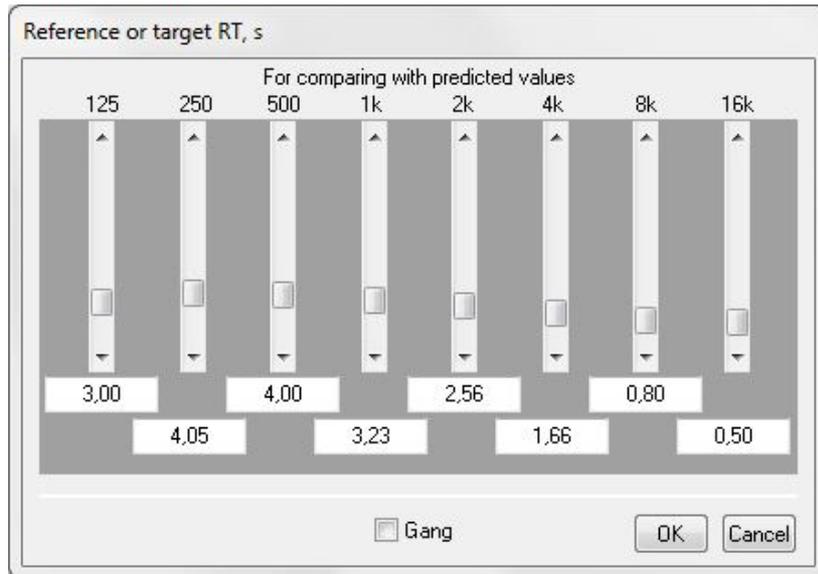


Ilustración 4-5. Captura de la ventana en que se introduce el tiempo de reverberación de referencia.

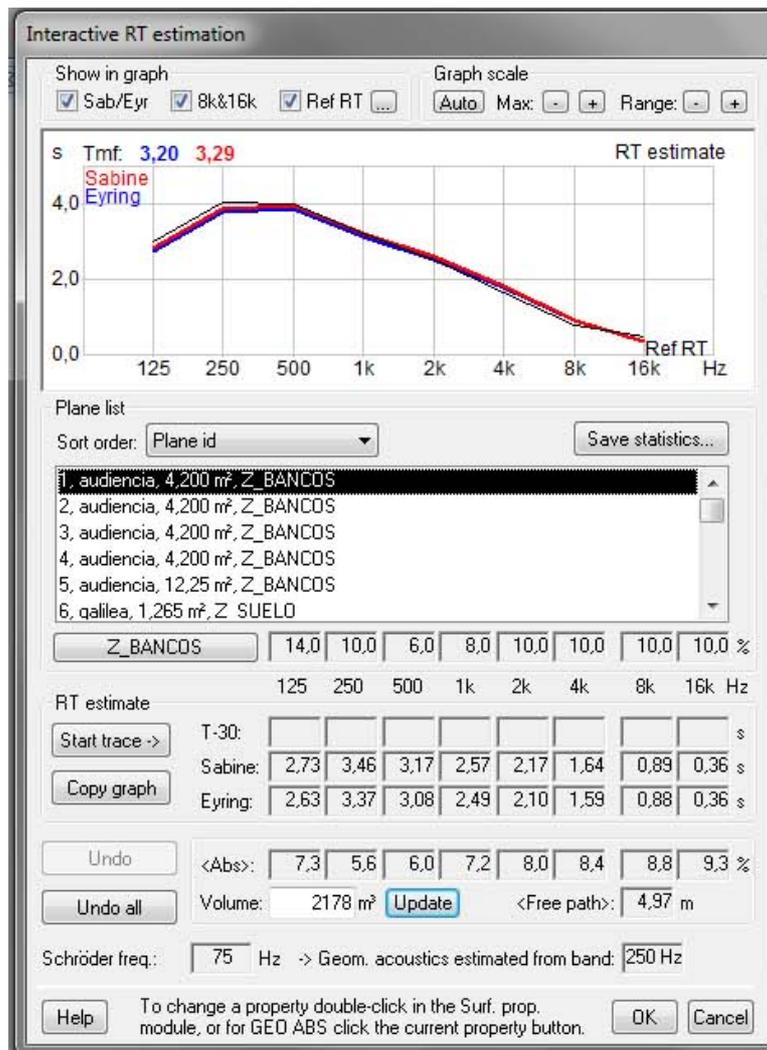


Ilustración 4-6. Captura del tiempo de reverberación obtenido, según los métodos de Sabine y Eyring, comparado con el medido.

4.4.1.1 Materiales

Los materiales finalmente escogidos se muestran a continuación (Tabla 4-2). Algunos de los materiales tuvieron que aceptarse por eliminación, por ejemplo los bancos. Sí que hay un material llamado 'pew' (banco de iglesia) pero al leer la descripción indica que estos bancos están llenos de audiencia y tapizados, por lo que no se pueden emplear para ajustar el tiempo de reverberación obtenido en la medición.

Tabla 4-2. Tabla de materiales empleados en CATT.

NOMBRE	MATERIAL CATT
Bancos	Wooden_door
Granito	Brick50
Guarnizado	Concrete_blk (modificado)
Madera	Wooden_door
Piedra	Brick_wall1
PiedraDifusión	Brick_wall1 (con difusión)
Público	Audience70
Retablo	Wood30 (modificado, con difusión)
Suelo	Concrete50
Terciopelo	Taperstry80

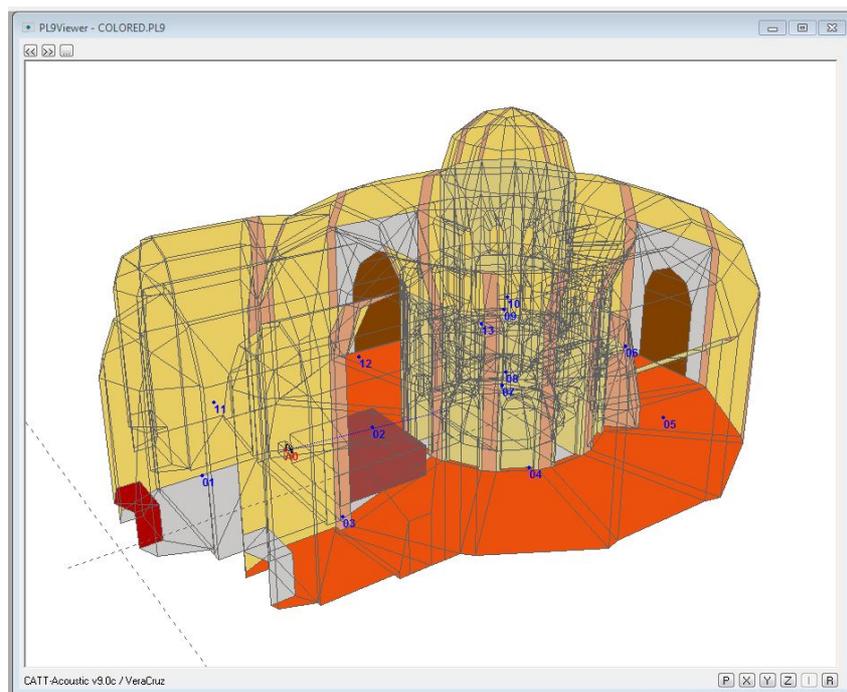


Ilustración 4-3. Captura del modelo con los materiales.

5 RESULTADOS

Los resultados obtenidos a través de la simulación digital en CATT Acoustic concuerdan con los obtenidos en las mediciones *in situ*. Se observa una gran homogeneidad en los mapas de nivel de presión acústica (Ilustración 5-1), aspecto que ya se aprecia en el Gráfico 4-1, lo que induce a pensar que esa geometría tiene un fuerte carácter acústico. Inicialmente van a analizarse resultados del conjunto de la iglesia de nivel de presión sonora, C80 y STI.

Posteriormente se van a caracterizar algunas de las posiciones a repartidas por toda la iglesia para definir y apreciar el cambio, o no, que sufren los parámetros al avanzar por el deambulatorio o entrar al edículo central.

Los resultados mostrados en este apartado son resultados obtenidos habiendo audiencia en la iglesia, por lo que las superficie que en el ajuste tenían el material “Bancos”, en la simulación tienen “Público”. Los resultados obtenidos en los puntos restantes se muestran en el Anexo V.

En este caso se ha empleado una fuente directiva para simular la emisión que provocaría una persona.

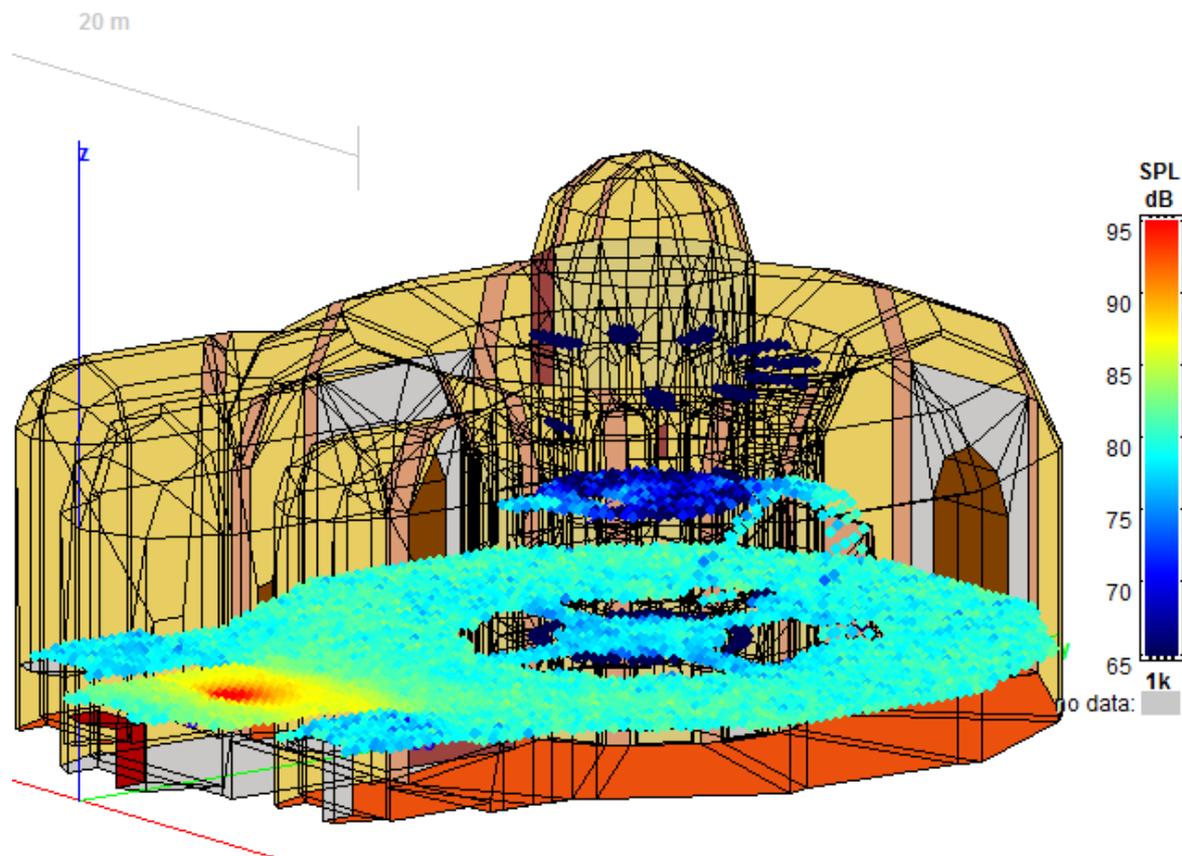


Ilustración 5-1. Mapa acústico de la iglesia con la fuente en la posición F1.

5.1 Tiempo de reverberación

Inicialmente se va a analizar el tiempo de reverberación obtenido, puesto que es lo que se ha empleado para ajustar el modelo y se ha explicado recientemente. En este caso va a utilizarse ya el tiempo de reverberación que se obtiene con audiencia en la iglesia (no con la sala vacía).

El tiempo de reverberación obtenido es de 2,22 segundos según la fórmula de Sabine, hasta un segundo más bajo que el que se da con la sala vacía (Figura 5-1). Las mayores diferencias se dan en las frecuencias de 250, 500 y 1000 Hz, esto se debe a la absorción de la audiencia. Como se observa en la Figura 5-1, la absorción de la audiencia a frecuencias a partir de los 250 Hz es notablemente mayor, causando dicho descenso.

Puede incluso que el tiempo de reverberación con audiencia fuera algo más bajo, puesto que la audiencia que asistía a los eventos no era como puede ser la actual, hablando en términos de absorción acústica. Los hábitos que vestían los miembros religiosos de la orden, se supone, serían muy absorbentes. Debido a la gruesa tela y la gran superficie de esta, y los numerosos pliegues que provocaba, además de que seguramente no estarían sentados, haría que cada asistente fuera más absorbente que lo que se considera actualmente. Dado que los datos de absorción de estos no se conocen y se mantienen los datos que aporta CATT Acoustic.

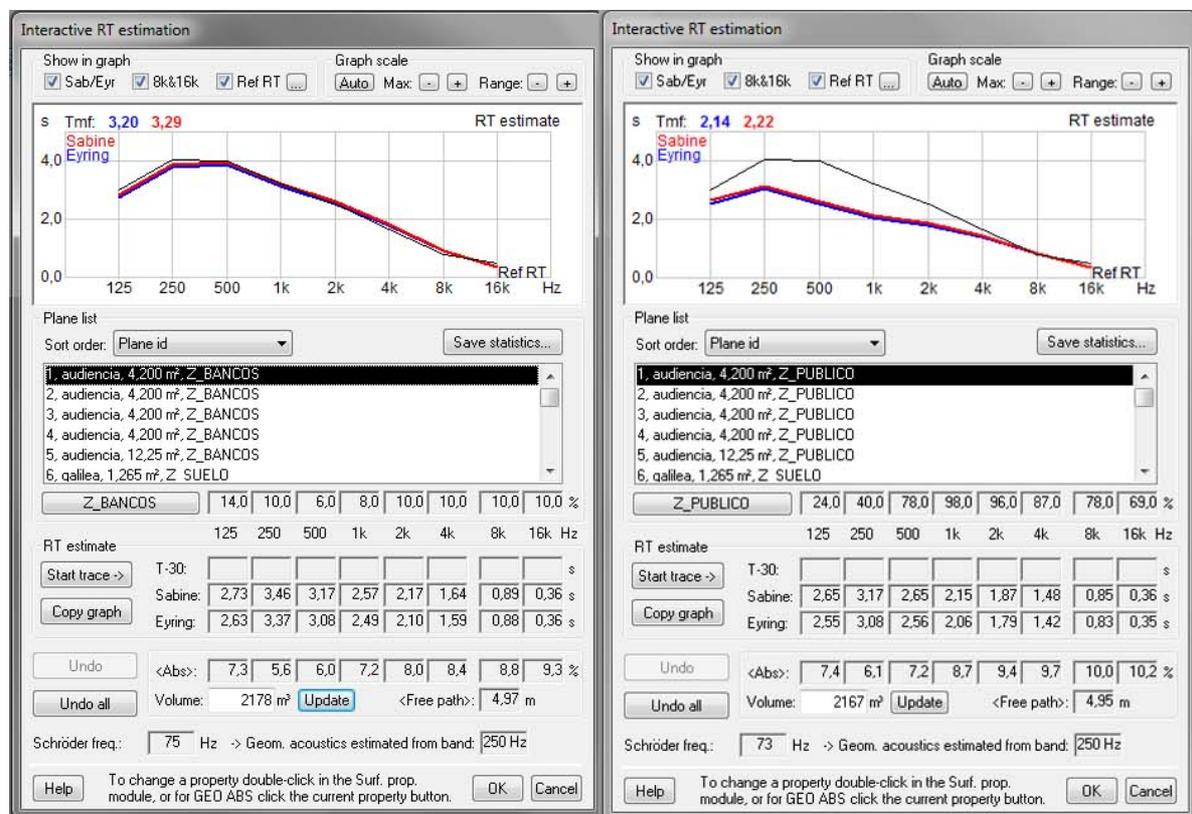


Figura 5-1. Comparativa entre el tiempo de reverberación con el recinto vacío y con audiencia.

En el capítulo 3 se muestra el Gráfico 3-5, en el que se indican los valores apropiados de tiempo de reverberación para un recinto en relación a su volumen y al tipo de emisión que se tenga. Pues bien, si introducimos en ese mismo gráfico el volumen de la iglesia, 2164 m^3 es el volumen aportado por CATT Acoustic, y el tiempo de reverberación obtenido con audiencia en la sala, se observa que es superior a los valores recomendados para recintos con ese volumen (Figura 5-2).

Los 2,22 segundos obtenidos están casi un segundo por encima del valor para la música sinfónica, es el doble que el recomendado para salas multiusos y un segundo y medio mayor que el recomendado para la palabra.

Sin embargo, este valor elevado no quiere decir que fuese necesaria una intervención para reducir este tiempo de reverberación hasta los valores recomendados. Como se ha visto anteriormente, las celebraciones y oraciones que realizaban los caballeros eran en gregoriano, es decir, cantos lineales, monofónicos y sin acompañamiento musical, por lo que no entraría en ninguno de los grupos que se indican en el gráfico, ya que no es palabra hablada, sino cantada, ni es música, ya que se interpretaba *a capella*.

Esas características del canto gregoriano hacen que un tiempo de reverberación elevado no perjudique su audición. Al ser melodías bastante lineales, con saltos no muy considerables, supeditadas a la letra y sin acompañamiento musical, el alto tiempo de reverberación potencia la sonoridad y la solemnidad de estos cantos. Además, los melismas también se ven reforzados por este tiempo de reverberación, así pues, no solo es adecuado este tiempo de reverberación tan elevado, sino que resulta beneficioso.

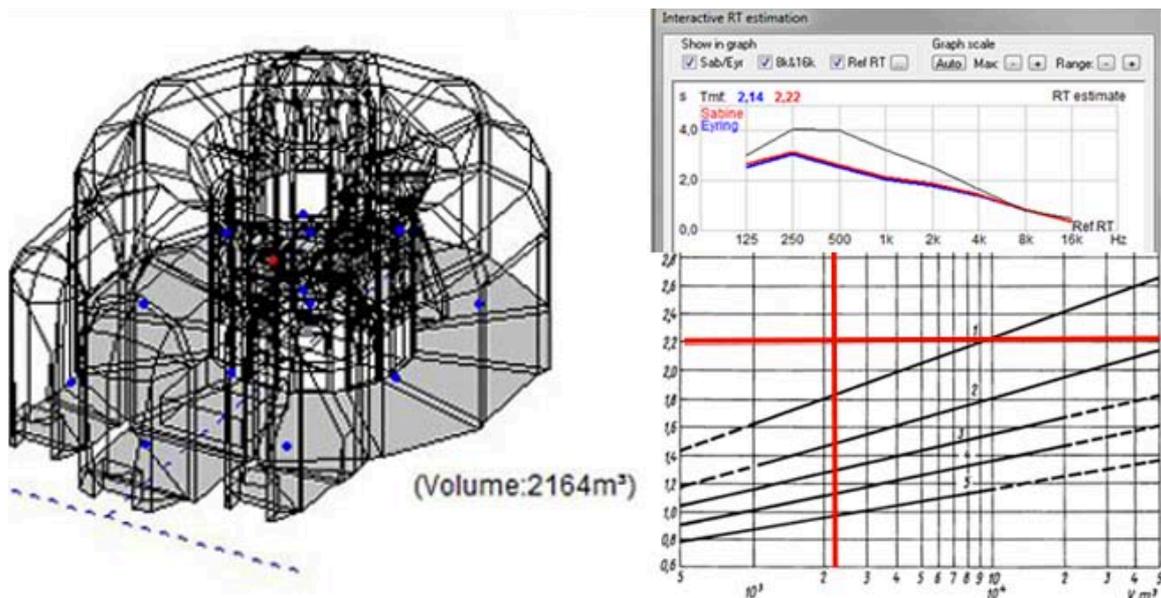


Figura 5-2. Volumen total de la iglesia, aportado por CATT Acoustic, y gráfico de valores recomendables de tiempo de reverberación en relación al volumen del recinto: 1- Salas para la palabra y música de órgano; 2- Salas para música sinfónica; 3- Salas para música de cámara, Óperas; 4- Salas multiusos, salas para musicales y teatro de drama; 5- Auditorios de lectura, salas de conferencias, salas de cine.

En la fórmula [3] del tiempo de reverberación se observa que este depende directamente del volumen del recinto, es decir, a mayor volumen, mayor tiempo de reverberación; y es inversamente proporcional a la superficie que abarca interiormente cada material y la absorción de este. Es esto último lo que propicia un tiempo de reverberación tan elevado. Las superficies son poco absorbentes y muy reflectantes en su mayoría, salvo las puertas y el retablo de madera y las someras piezas de terciopelo presentes en la iglesia.

Los valores de absorción, reflexión y difusión de cada material se muestran en el Anexo III, donde se observa que, salvo la madera y el terciopelo presente en uno de los altares, todos los materiales tienen una absorción muy baja. Por esto, la presencia de audiencia en la iglesia hace bajar en gran medida este tiempo de reverberación.

5.2 Campo acústico

En cuanto al campo acústico, se van a analizar y comparar los mapas acústicos de la iglesia con la fuente en los dos puntos de emisión para observar si alguna es más adecuada o los dos puntos de emisión crean un campo acústico homogéneo en toda la iglesia. Los gráficos obtenidos en la medición *in situ* inducen a pensar que sí, que se obtiene un campo homogéneo en todo el deambulatorio, pero interesa saber qué ocurre cerca de las paredes puesto que, como se ha indicado en el apartado de los ritos de la orden, alguno se realiza a lo largo del deambulatorio y subiendo por las escaleras.

No solo va a compararse el campo acústico provocado por cada posición de medida, sino que va a compararse cada uno con el campo de emisión directa su respectiva fuente (Ilustración 5-2).

Analizando primero la posición de fuente F1, se observa que el nivel de presión sonora es muy homogéneo en todo el recinto, también en las zonas a las que no llega sonido directo. Es fácilmente comprensible que las zonas de sombra del deambulatorio tengan el mismo nivel debido a las reflexiones que se producen en las superficies a las que sí que llega. Ya que que interiormente los lienzos son curvos, el sonido se refleja como se muestra en la Figura 3-4, repartiéndose igualmente por todo el deambulatorio.

Sin embargo en los ábsides laterales hay un nivel parecido al del deambulatorio, ligeramente más bajo. No se observa que pueda justificarse este hecho fácilmente a través de la acústica geométrica.

Es decir, emitiendo desde el altar ubicado en el ábside principal, se obtiene un campo acústico que podría definir el recinto como equipotencial. Esto parecía obvio, ya que el hecho de que este ábside central sea más grande hace evidente que servía como foco de emisión.

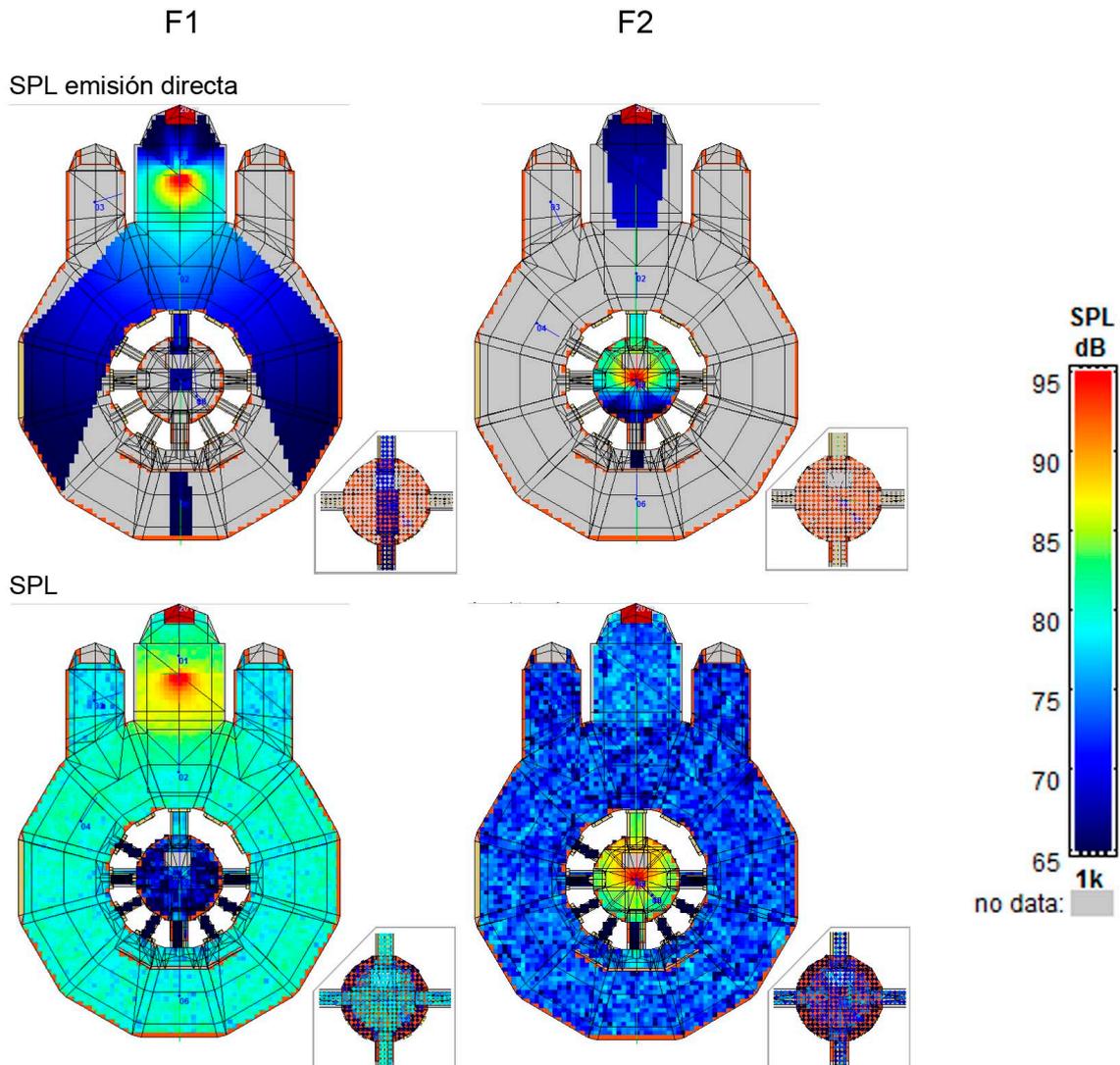


Ilustración 5-2. Comparativa de mapas de SPL directo y SPL causados por ambas fuentes, F1 y F2. En el recuadro se muestra el mapa de la estancia inferior del edículo central.

Sin embargo, analizando el campo acústico originado por la fuente en la posición F2 este hecho se hace más patente. Cabe recordar la geometría de esta estancia, muy esbelta, con dos huecos de tamaño importante y otros diez de tamaño reducido y a gran altura del suelo.

Como se aprecia en el mapa de emisión directa, la zona en la que se recibe sonido directo es muy reducida, dándose, además de en el propio recinto, en el ábside principal. Aún así, el mapa de nivel de presión sonora es prácticamente igual de homogéneo que el primero, lógicamente con niveles más bajos, lo que remarca sin lugar a dudas el carácter acústico de la geometría de la iglesia. En este caso, incluso, el nivel de los ábsides laterales y del deambulatorio es el mismo y la diferencia con el ábside principal parece menor, aún recibiendo sonido directo y teniendo una geometría que favorece las reflexiones.

La estancia superior además tiene otro aspecto a destacar. Como se aprecia en el mapa de emisión directa, justo detrás del altar superior tiene recepción directa con la fuente en F1, lo que supone conexión visual directa. Esto puede deberse a que se realizaran algunas de las celebraciones con dos oficiantes, o que en esta estancia superior se encontrara el coro que interpretara las oraciones. Sin embargo, el mapa de nivel de presión incluyendo reflexiones muestra que el nivel en toda esta estancia es también homogéneo.

Inicialmente se planteaba la hipótesis de que las 8 ventanas dispuestas asimétricamente respecto del eje longitudinal de la iglesia tuvieran funcionalidad acústica. Este último aspecto hace pensar que si que tienen diferentes funciones para los dos puntos de emisión planteados.

Por un lado, permiten la entrada de parte del sonido emitido desde el altar principal, causando el mencionado campo acústico homogéneo, y que no se tenga un nivel mayor en el eje longitudinal por el que entra el sonido.

Además se observa cómo deja escapar parte del sonido emitido desde dentro de la estancia. Esto seguramente tenga dos objetivos: el primero, no provocar un nivel demasiado alto dentro de la estancia; y el segundo, que el sonido expulsado ocasione que en el deambulatorio se reciba sonido y, además, sea de manera homogénea en todo él.

Las ventanas no reciben sonido directo cuando la emisión se realiza desde el edículo central, debido a su altura, y se da el mismo nivel que cuando la emisión se realiza desde el altar principal, un nivel muy bajo, el menor de todo el recinto, aun estando muy próximas a la posición de emisión F2.

Otro punto que llama la atención al analizar estos mapas es el campo acústico que se da en la estancia inferior del edículo central. Emitiendo desde el altar principal, dentro de la propia estancia se obtiene un nivel muy homogéneo en toda ella. No tiene mayor nivel en el eje longitudinal, donde se ubican dos puertas alineadas con la emisión como se ve en el mapa de emisión directa, sino que en el eje transversal tiene el mismo nivel.

Claramente la geometría de la estancia es la causante de esto. Podría considerarse prácticamente una semiesfera, con el diámetro horizontal mayor elevado del suelo. Como se ha mencionado en el apartado de acústica, la relación entre el radio y la altura de las bóvedas o cúpulas es la causante de focalizaciones o no. En este caso, la altura de la cúpula es mayor que su radio, pero no que su diámetro. Esta bóveda estaría entre el primer y el tercero de los casos que se muestran en la Figura 3-5, por lo que las focalizaciones se darían a una altura muy baja que no afectaría a la audición.

Únicamente en el perímetro de esta estancia es donde se da un nivel de presión sonora destacadamente más bajo, pero no es demasiado relevante puesto que la altura del recinto en estos puntos no permite la presencia de personas erguidas.

Otra de las herramientas facilitadas por CATT que muestra la homogeneidad del campo acústico que se da en la iglesia es el histograma. Estos gráficos indican qué porcentaje de la superficie recibe cada nivel de presión acústica, es decir, muestran estadísticamente el campo acústico de un recinto.

Los dos histogramas (Figura 5-3) muestran de nuevo una gran homogeneidad de niveles que se dan en la iglesia, aunque ya se ve que la homogeneidad es mayor para la posición de fuente F1. Mientras que con la fuente en el altar principal se obtiene un histograma más estrecho y alto, el de la fuente F2 es más bajo y ancho. La interpretación de los histogramas resulta más sencilla después de haber visto y analizado los mapas. La mayor superficie la abarcan el deambulatorio y los ábsides, que tienen un nivel similar entre sí en ambos casos, lo que causa que un pequeño rango de niveles abarque un gran porcentaje del total.

Sin embargo, con la fuente en el altar principal no es solo en los ábsides y el deambulatorio donde se obtiene un nivel similar, sino que a ellos se suma el recinto inferior del edículo central. Esto hace que el rango de niveles disminuya y aumente el porcentaje de dicho rango. Al contrario que con la fuente en F2, ya que el nivel que se obtiene en la estancia inferior es menor que en el deambulatorio y los ábsides, por lo que resta porcentaje de esos niveles, sumándolo a niveles inferiores, abarcando así un porcentaje representativo.

En ambos gráficos se identifican los niveles que se reciben en las proximidades de las fuentes y ambos son muy similares, entorno a los 85 dBA y suponiendo aproximadamente un 1% del total.

Además, estos histogramas muestran el nivel medio del recinto, 78,6 dBA en el primer caso y 73,1 dBA en el segundo, diferencia importante, pero no tanto como podría pensarse observando los mapas.

CATT aportó los dos histogramas con diferente escala, por lo que se modificó el de la posición F1 (que abarcaba hasta el 20%) para que la comparación fuera más sencilla.

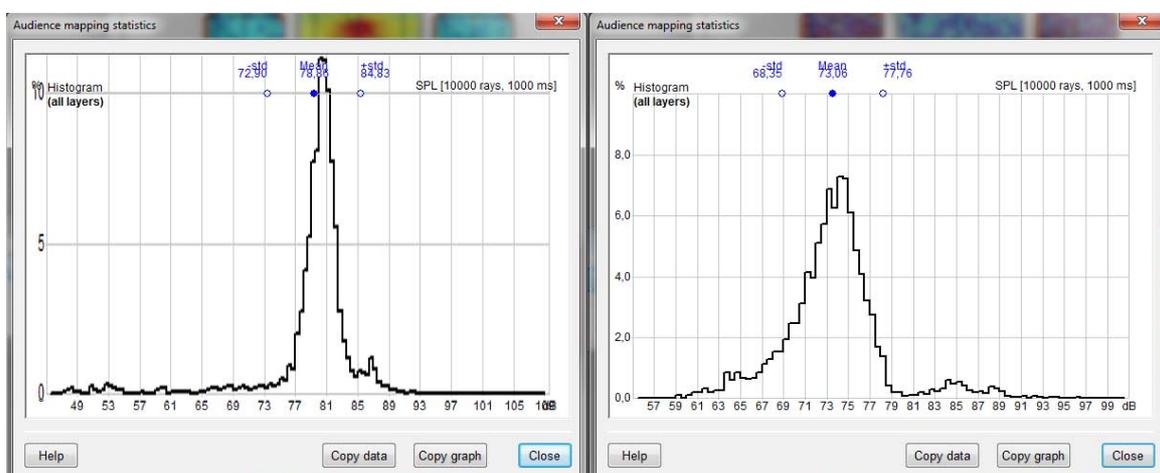


Figura 5-3. Comparativa de los histogramas para fuente en F1 –izquierda- y fuente en F2 –derecha-.

5.3 C80

Con el C80 sucede el mismo caso que con el tiempo de reverberación. C80, o C50 son indicadores de claridad para la música o la palabra, pero en este caso la emisión que se produciría no podría incluirse en ninguna de las dos, por lo que la desviación o no de los valores adecuados no significaría necesariamente un problema de audición.

Otro aspecto que hace que los resultados del C80 sean dudosos es la diferencia que hay en los valores recomendados vistos anteriormente, entre -4 y 0 dBA o entre -2 y 2 dBA. Por esto, en vez de buscar precisión en la escala de resultados que mostraran los mapas (Ilustración 5-3), se definió un rango de medidas amplio, así se centraban los resultados óptimos cercanos al 0. Es decir, los valores representados en los mapas de un color verde azulado, serían los que están dentro de los valores recomendados.

Se observa una vez más que, con la emisión en la posición de fuente F1, los valores en el deambulatorio están dentro de los valores recomendados, algo que, por el elevado tiempo de reverberación, se pensó a priori que sería así. Sin embargo, en este caso no todo el deambulatorio muestra resultados similares, puesto que en la mitad oeste (parte baja en los mapas) se aprecia un gran número de puntos más oscuros, sobre todo próximos al muro del edículo central. Es decir, en las zonas de sombra de sonido directo y los puntos a los que las primeras reflexiones llegan después, presentan valores desfavorables.

En el ábside principal también hay valores dentro de los recomendados, pero estos se dan fuera de las proximidades de la fuente. Sin embargo, el C80 obtenido en los ábsides ya se separa del resultado obtenido en todo el deambulatorio. Es decir, a pesar de obtenerse un nivel de presión sonora bastante similar, la claridad es muy diferente.

Por su parte, en la estancia inferior del edículo central se obtiene que la claridad es aceptable solamente en el pasillo que sigue el eje longitudinal, por el que entra el sonido directo. Lo mismo ocurre en la estancia superior, donde solamente se obtienen valores aceptables en el pequeño espacio que hay tras el altar, la única zona donde se obtiene sonido directo. Incluso en la proximidad de alguna de las ocho ventanas de esta estancia se obtienen valores próximos a los recomendados.

La interpretación de este resultado es que el sonido creado por las reflexiones no es homogéneo o no es continuo, lo que no crea un sonido con buena claridad. Es decir, para la posición de fuente F1, se obtiene un buen C80 en todo el deambulatorio y en los puntos de las dos estancias del edículo central donde se recibe sonido directo. Como ocurría anteriormente, los valores que se dan en el deambulatorio son los valores que más porcentaje abarcan.

Sin embargo, toda la estancia inferior del edículo central, incluso entradas con las que cuenta, salvo algún punto, se muestra del color verde azulado que representa valores dentro de los recomendados. Puede parecer sorprendente, pero analizándolo no lo es tanto, ya que el campo acústico creado en esta estancia se origina a partir del sonido que entra por los cuatro accesos. Estos están repartidos de forma uniforme en el perímetro, por lo que se crea un campo acústico homogéneo en toda la superficie. Si a esto se le une que llega aproximadamente el mismo nivel por todas las entradas, resulta un campo acústico homogéneo y con buena claridad.

Pero no todas las entradas presentan el mismo valor, sino que en la entrada este, alineada con el ábside principal, se obtiene un color más oscuro. Esto se debe a la presencia de audiencia delante de esta entrada, que hace que el sonido que entra llegue con menor nivel y que el C80 resultante no esté dentro de los valores recomendados.

En el histograma correspondiente a la posición de fuente F2 se observa que el rango de valores obtenidos es muy amplio y solo un pequeño porcentaje del total presenta resultados dentro de los valores óptimos. En este caso, en el rango entre -6 y 2 dBA se obtiene algo menos del 2% del total, mientras que valores inferiores se obtienen en más del 2%. En este aspecto, este histograma es diferente a los demás, puesto que no se cumple el hecho de que los valores que se dan en el deambulatorio destacan en el histograma. Esto es debido a que, esta vez, el deambulatorio presenta un comportamiento homogéneo pero no entorno a un único valor, sino entorno a dos valores, que si que se identifican sobresaliendo en el histograma.

5.4 STI

En este caso, el STI serviría solo para definir la inteligibilidad del recinto en los eventos en los que no se entonara canto gregoriano, como podrían ser los nombramientos de nuevos caballeros.

Los resultados que muestran los mapas de STI (Ilustración 5-4) son similares a los obtenidos para otros parámetros, sin embargo, hay pequeñas diferencias. Cabe recordar que la escala de valores del STI va del 0 hasta el 1, siendo 0 MALO (BAD), y el 1 EXCELENTE, pasando por POBRE (POOR), ACEPTABLE (FAIR, aunque “fair” significa “justa”, por tanto tendría un sentido más negativo) y BUENO (GOOD).

Para empezar, ocurre lo contrario que con el C80, ya que en las proximidades de ambas fuentes es donde se obtienen resultados excelentes y buenos, al igual que, generalmente, en las zonas a las que llega sonido directo. Sin embargo, con la fuente en la posición F1, los dos ábsides muestran resultados pobres y, del mismo modo que ocurre

La mayoría de estos puntos se localizan en la sección oeste, seguramente por la emisión que pueda salir por el hueco de acceso a la estancia (aunque la emisión se realiza hacia el lado opuesto). Lo que se mantiene es la inteligibilidad buena en el ábside principal al recibir sonido directo y, lógicamente en la toda la estancia superior.

Es en estos mapas de STI en los que se observa la función de las ocho ventanas de la estancia superior del edículo central. En ellas se obtienen valores excelentes para ambas posiciones de fuente, a pesar del bajísimo SPL, el único punto además de las proximidades más inmediatas de la fuente.

Para la posición de fuente F2 podría parecer más lógico, puesto que están alineadas con la emisión –aunque la emisión sea en una dirección y las ventanas estén detrás de la fuente-, sin embargo, anteriormente se ha visto que no reciben sonido directo de esta fuente, debido a su altura. Aún así, al estar alineadas con la emisión y por la forma que tienen, alargadas acabadas con bóveda de cañón, y siendo la altura mayor al doble del radio, se crea un campo acústico homogéneo y, en este caso, inteligible.

Sin embargo, para la emisión desde F1, la llegada de sonido directo es muy complicado y el que llega es tras varias reflexiones, con lo que esto supone, y aún así se obtienen resultados excelentes.

Pero el hecho que indica la funcionalidad está en los resultados obtenidos en el interior de la estancia superior del edículo central para la emisión desde F1. En la proximidad de las ventanas se obtiene una pequeña zona con una inteligibilidad buena. Esta zona próxima al muro se corresponde con los bancos de esta estancia.

Es decir, para una celebración en la que se emita solamente palabra, la mejor inteligibilidad se obtiene en puntos que reciben emisión directa y en las ventanas y sus proximidades –los bancos de la estancia superior del edículo central-.

Lo que ocurre en la estancia inferior del edículo central es llamativo. En este caso, para ambas posiciones de fuente se obtiene el mismo mapa de inteligibilidad, con un valor justo, pero uniforme en ambos casos. No se obtiene una franja longitudinal con mayor claridad con la posición de fuente F1 como sí que se obtenía con el C80, ni hay diferencia en los accesos debido a la presencia de la audiencia justo delante de la este. Además, en el perímetro hay puntos en los que también se obtienen valores excelentes. En este aspecto también ocurre lo contrario que con el C80, el cual en las proximidades de los paramentos presentaba resultados peores que en el centro de la estancia.

Observando los histogramas del STI se observa lo que inicialmente, viendo el tiempo de reverberación, se suponía. No es una iglesia en la que la inteligibilidad de la palabra sea buena, ya que la mayoría de los valores están dentro del rango de inteligibilidad JUSTA. Sin embargo, se obtiene mayor porcentaje de valores buenos o excelentes cuando la emisión se realiza desde la estancia superior del edículo central, hecho que

resulta sorprendente al tratarse de una estancia bastante aislada del resto de la iglesia y teniendo la geometría interior tan esbelta, que hace que muchos rayos vayan hacia arriba, haciendo imposible que salgan al deambulatorio.

Los valores obtenidos en el rango definido como BUENO rozan el 5% del total en este caso, mientras que con la fuente en la posición F1 apenas llega al 3%. Además, el valor medio de inteligibilidad es mayor también en este caso, hasta medio punto mayor. Esto se debe a que el pico no es tan alto y esbelto como con la fuente en F1. A esto también contribuye que, con la fuente en F2 se obtienen valores excelentes de 1 punto, el máximo, no siendo así para la fuente en F1. De cualquier modo, los porcentajes de resultados excelentes son muy similares en ambos casos, ligeramente superiores al 1%.

5.5 Parámetros en receptores

Una vez analizado el conjunto de la iglesia a partir de los diferentes mapas de cada parámetro, se van a caracterizar y analizar los resultados obtenidos en algunas de las posiciones de receptor determinadas. Con esto se va a observar el cambio –o no– de los valores de cada parámetro según se va recorriendo la iglesia para ambas posiciones de fuente, o identificar las similitudes o tendencias que compartan.

Además, el análisis en un punto de recepción se realiza en el espectro de frecuencias, siendo muy útil para delimitar el rango de frecuencias al que sería más adecuado emitir en esta iglesia –frecuencias bajas, medias o altas–.

Los puntos que se van a analizar son:

- S2: en el deambulatorio delante del ábside principal, zona de ubicación de la audiencia.
- S4: en la zona norte del deambulatorio.
- S6: sección oeste del deambulatorio, zona opuesta a la emisión.
- S7: en el centro de la estancia inferior del edículo central.
- S9: en el centro de la estancia superior del edículo central.

Estos gráficos aportan un conocimiento añadido al que muestran los mapas generales de toda la iglesia. Comenzando por el SPL, que muestra el ecograma de energía en rojo y la respuesta impulso de la presión en azul, se observa la gran contribución del sonido reflejado en el nivel de presión acústica recibido. El ecograma muestra si la evolución del sonido es paulatina con tendencia lineal o si tiene saltos que hace que el sonido recibido no sea continuo. En los gráficos de C80 y STI se identifican las frecuencias más claras e inteligibles en cada punto y el valor global.

F1xS2

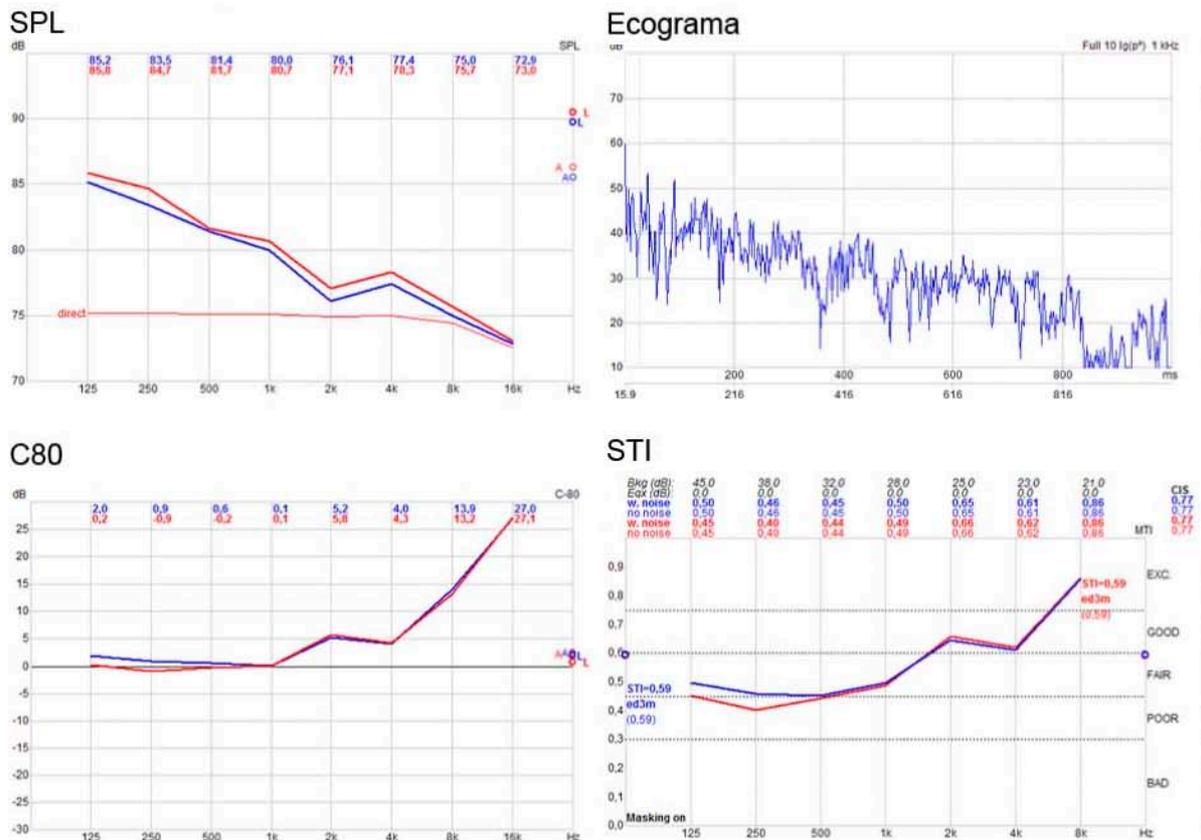


Figura 5-4. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S2 con la fuente F1.

El primer punto a analizar, la posición S2 (Figura 5-4), se sitúa delante del ábside principal, es decir, la ubicación más habitual de la audiencia. En el primer gráfico, de SPL, se puede observar como el sonido reflejado es el más importante a medias y bajas frecuencias, donde el nivel recibido es 10 dBA mayor que el sonido que llega directamente. La diferencia del nivel global entre sonido directo y nivel global es de 5 dBA (86,5 dBA y 91 dBA respectivamente). En esta posición se reciben todas las reflexiones del ábside, del muro del edículo central y de la bóveda del deambulatorio.

El ecograma muestra que el sonido tiene caída con tendencia lineal pero presenta algunos valles y subidas bruscas. Estas caídas pueden ser perceptibles, puesto que cerca de los 400 ms. hay una caída brusca y una subida de 20 dBA de diferencia. Puede deberse a alguna frecuencia que entre en resonancia en este punto.

En cuanto a la claridad e inteligibilidad, el global de ambas se encuentra dentro de los valores recomendados, pero por motivos contrarios. Mientras que el C80 óptimo se da a bajas frecuencias hasta los 4000 Hz, el STI muestra un resultado BUENO a partir de los 2000 Hz. La justificación está en los valores de tiempo de reverberación, mayor a frecuencias medias y bajas, que beneficia a la recepción de música, y perjudica la inteligibilidad de la palabra; y menor a frecuencias altas, ocurriendo todo lo contrario.

F1xS4

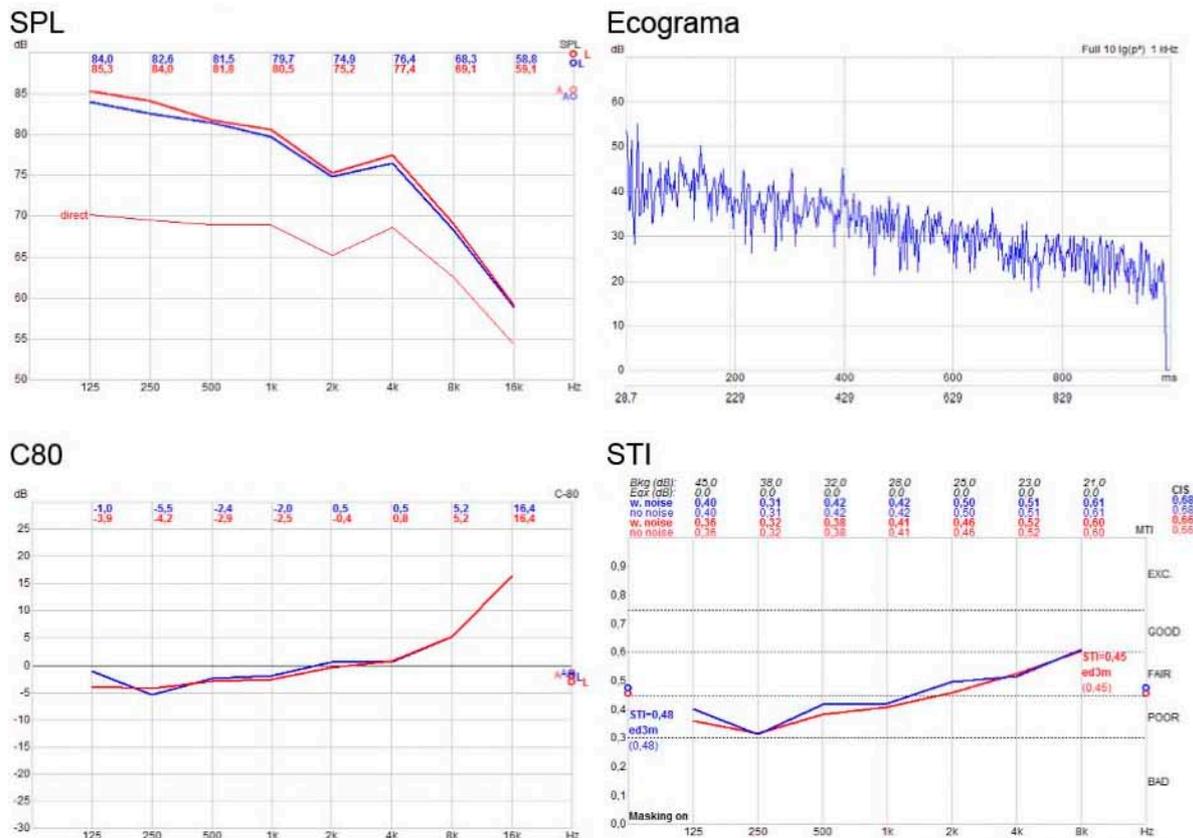


Figura 5-5. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S4 con la fuente F1.

Recorriendo el deambulatorio se llega al punto S4 (Figura 5-5). En este punto el gráfico de SPL por frecuencias es similar al de la posición S2, mostrando una caída a 2000 Hz y volviendo a subir en los 4000 Hz. En este caso, al estar más alejado de la fuente, la diferencia entre sonido directo y reflejado es de 15 dBA, sin embargo, el nivel global es de 90 dBA, solo 1 dBA más bajo que en el anterior punto.

El ecograma muestra una caída más continua, sin valles ni subidas bruscas. Pero la caída es más tendida, por lo que en este punto se obtendría un tiempo de reverberación mayor. Podría deberse a que las reflexiones llegan desde diversos puntos, con diferentes recorridos, aumentando el periodo en que se reciben rayos.

Los gráficos de claridad e inteligibilidad siguen la tendencia del punto anterior, sin embargo en este caso la inteligibilidad es justa o pobre en todo el espectro. Debido al tiempo de reverberación mayor que se observa en el ecograma y que se ha obtenido anteriormente. La curva de inteligibilidad es más continua, sin picos ni valles destacados.

Por su parte, la claridad musical sigue dentro de los valores en este caso hasta los 8000 Hz y la media se mantiene dentro del intervalo recomendado. En ambos puntos, es muy constante en hasta los 1000-2000 Hz.

F1xS6

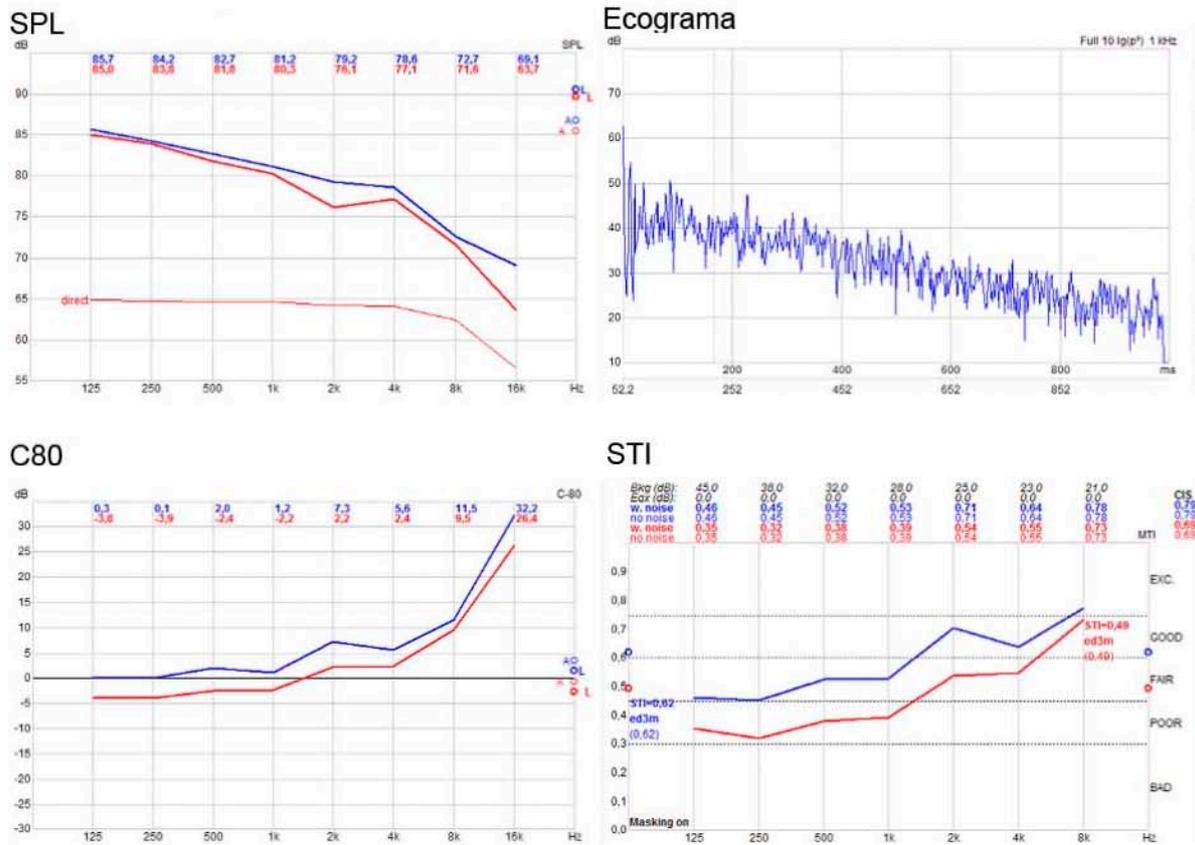


Figura 5-6. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S6 con la fuente F1.

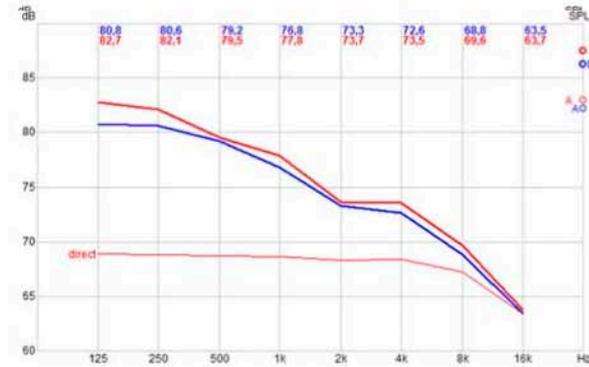
Este punto está en el lado opuesto de la emisión, en el deambulatorio, al otro lado del edículo central (Figura 5-6). Es el punto más cercano a la carretera. Aún así, los accesos a la estancia inferior orientados en los puntos cardinales provoca la llegada de sonido directo. El descenso de su nivel sigue la pauta de los anteriores puntos, si en S2 el sonido directo la gráfica comenzaba en 75 dBA y en S4 comenzaba en 70 dBA para ir disminuyendo con la frecuencia, en este caso comienza en 65 dBA. Sin embargo, el nivel global sigue estando en 91 dBA. La escala vertical del gráfico va reduciéndose por la mayor diferencia entre el sonido directo y el global, llega a ser de 20 dBA en los 125 Hz.

El ecograma en este punto es muy similar al anterior, caída continua, algo más pronunciada que en el caso anterior. Puede deberse al comportamiento simétrico de la iglesia –este punto está en el eje de simetría, igual que la fuente y el punto S2-.

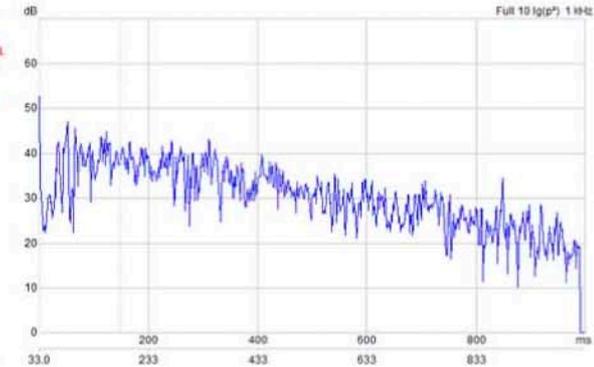
En este punto, las dos gráficas que se muestran de C80 y STI tienen mayor diferencia entre ellas. Esto se debe al diferente ruido de fondo que existiría en cada caso (se dejó el ruido de fondo predeterminado). En el C80 ambos resultados se encuentran dentro de los valores recomendados y el gráfico tiene la misma tendencia que los anteriores. El STI, por su parte, dependiendo del ruido de fondo será bueno o justo.

F1xS7

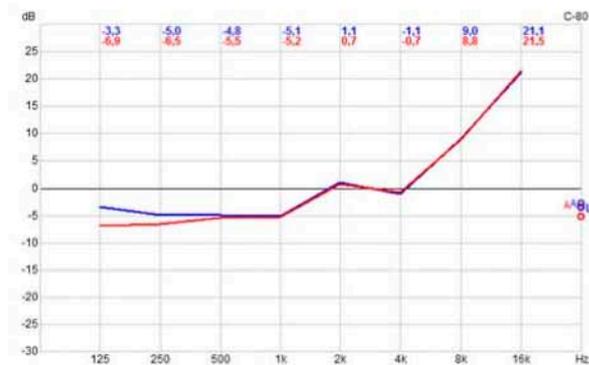
SPL



Ecograma



C80



STI

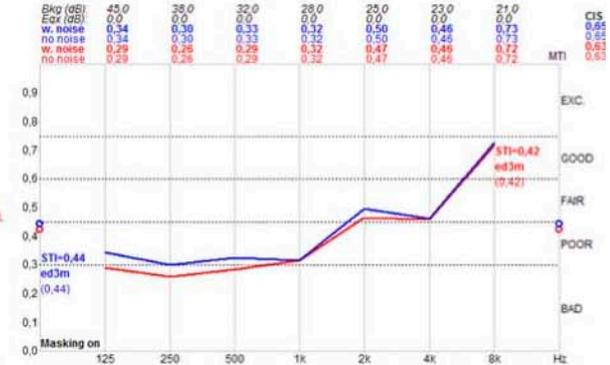


Figura 5-7. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S7 con la fuente F1.

Accediendo al punto central de la estancia inferior del edículo, S7, (Figura 5-7), se observa cómo el ruido directo recibido es ligeramente inferior al del punto S2, puesto que está solo unos metros detrás, pero el nivel global ya baja de los 90 dBA. A este punto entran muy pocas reflexiones y la mayoría de ellas son las que han ido hacia la parte posterior de la fuente y se han reflejado en el ábside, por lo que recorren una gran distancia. Esto se identifica perfectamente en el ecograma, donde se observa el sonido directo y cómo hasta los 50 ms. no vuelve a subir el nivel. Una vez que el sonido ha entrado en la estancia, el ecograma es bastante horizontal, por lo que el nivel se mantendría durante un periodo de tiempo antes de comenzar a descender.

La claridad e inteligibilidad vuelve a mostrar las dos curvas muy similares, ya que este punto está bastante aislado del ruido del exterior. Presentan la misma tendencia que en todos los casos anteriores, curvas cuasi horizontales hasta 1000 Hz donde comienza a ascender. En este caso, el C80 está en el límite de lo recomendado y el STI resulta pobre, ni siquiera justo. Ambos resultados provocados por el retardo del sonido reverberado y la inteligibilidad, además, por el tramo horizontal que presenta el ecograma desde 100 hasta 350 ms. aproximadamente.

F1xS9

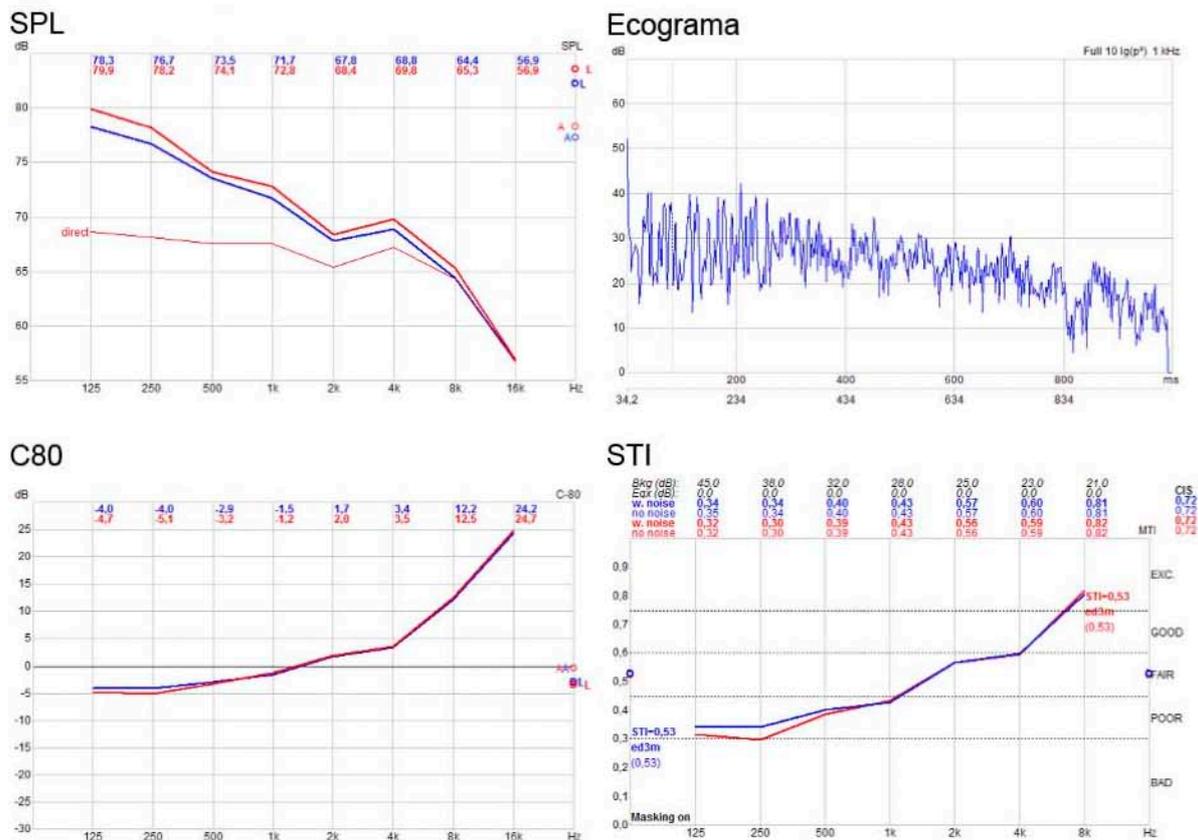


Figura 5-8. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S9 con la fuente F1.

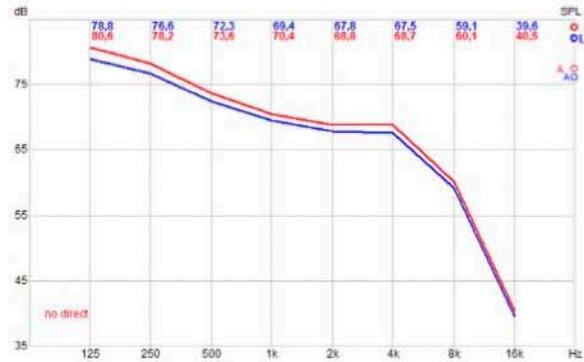
El último punto a analizar con la fuente en la posición F1 es el centro de la estancia superior del edículo, S9, (Figura 5-8). El gráfico de nivel de presión sonora es similar a todos los anteriores, con el nivel global ligeramente inferior a 85 dBA. Sin embargo el sonido directo no sigue la pauta de los otros tres puntos alineados con la fuente, que presentan una línea plana hasta los 4000 Hz, este punto sufre una ligera caída a 2000 Hz.

En el ecograma se observa lo mismo que en el punto anterior, al ser una estancia aislada del exterior, llega el sonido directo y el reverberado tarda en llegar, en este caso con un nivel considerablemente inferior. El primer tramo es muy irregular, con subidas y bajadas bruscas y continuas, pero dentro de un rango similar. Posteriormente comienza la caída, presentando un marcado valle al final.

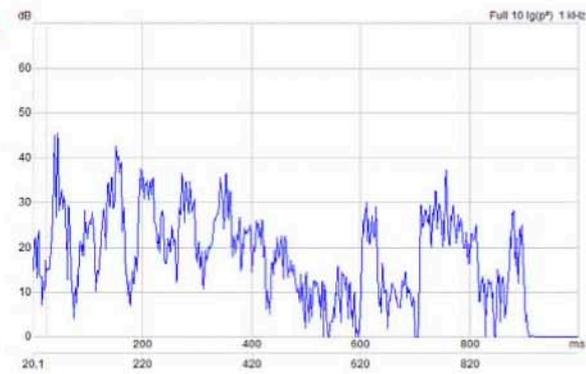
En este caso, las gráficas de C80 y STI son siempre tendiendo hacia arriba, no tan horizontales como se observan en los otros puntos. Aun así, igual que en el punto S7, las dos curvas de cada gráfico son muy similares por ser una estancia muy aislada. Los valores globales de claridad están dentro de los recomendados, mientras que la inteligibilidad que se obtiene es justa. Ambos resultados se justifican una vez más por el tiempo de reverberación y el primer tramo del ecograma.

F2xS2

SPL



Ecograma



C80



STI

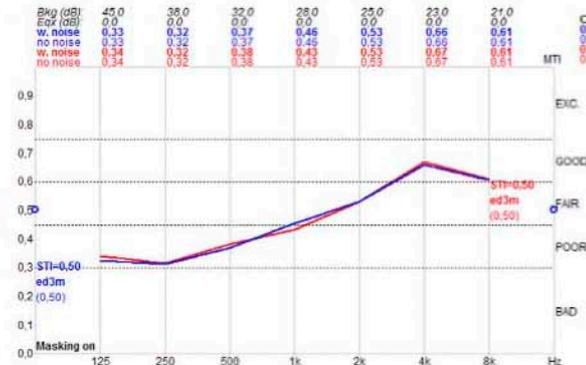


Figura 5-9. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S2 con la fuente F2.

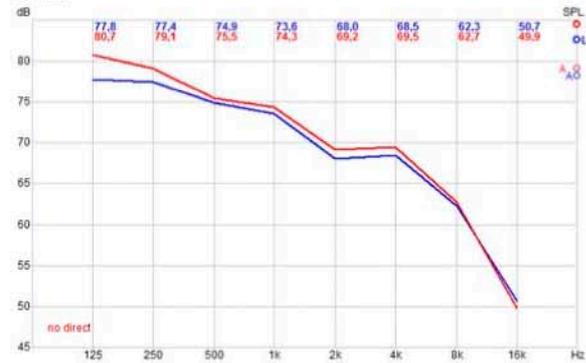
Para la posición de fuente F2 van a analizarse los mismos cinco puntos. Los cuatro primeros no recibirán sonido directo con esta fuente. Comenzando por el punto S2 (Figura 5-9), el gráfico de SPL continúa la tendencia anterior, obteniendo el mayor valor a las frecuencias más bajas. Aun así, solamente con sonido reflejado, y teniendo en cuenta la pequeña ventana por la que el sonido accede al deambulatorio, se obtienen prácticamente 80 dBA.

El ecograma de este punto y con esta fuente es diferente a todos los demás. Se recibe el sonido de forma intermitente. El primer sonido recibido es con un nivel muy bajo, que aumenta tras la llegada de reflexiones posteriores. El ecograma presenta subidas y bajadas en el nivel bastante periódicas en el tiempo pero sin seguir un patrón de subida y bajada. Este ecograma puede deberse a que se obtienen reflexiones del propio hueco en el muro, de la bóveda del deambulatorio y del ábside. Estos rayos además vuelven a reflejarse en el muro del edículo llegando una vez más al receptor.

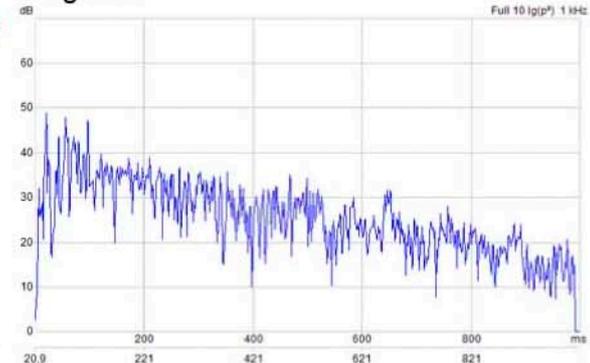
Los gráficos de C80 y STI son similares a los obtenidos anteriormente. El C80 vuelve a enmarcarse dentro del intervalo de resultados recomendados, mientras que el STI resulta justo. Algo lógico por el ecograma tan intermitente que presenta este punto.

F2xS4

SPL



Ecograma



C80



STI

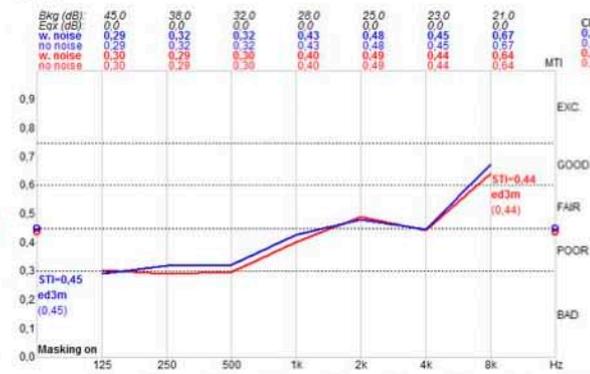


Figura 5-10. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S4 con la fuente F2.

En el punto S4 (Figura 5-10) se obtienen gráficos muy similares a los que se obtienen con la emisión en la posición F1, aunque sin el sonido directo, lógicamente. Nivel de presión sonora global de 85 dBA y la curva en frecuencias con la misma tendencia descendente. Aunque en este caso hay mayor diferencia entre las frecuencias bajas y las medias-altas, teniendo la curva mayor inclinación.

En este caso, el ecograma muestra claramente el retardo en la llegada del sonido. La situación de este punto hace que el primer sonido que le llegue sea el que ha salido de la estancia a través de una de las pequeñas ventanas. Se aprecian unos primeros instantes en que se producen subidas y bajadas bruscas pero seguidamente el gráfico comienza a descender con una tendencia continua, mostrando algún pequeño valle.

Una vez más, la claridad e inteligibilidad presentan gráficos similares a los anteriores. El C80 vuelve a instalarse dentro de los valores recomendados, en este caso en el límite inferior, ya que las frecuencias más bajas están fuera de lo recomendado. Mientras que el STI es pobre. Puede deberse a la gran diferencia de nivel en las frecuencias o al primer instante en que se recibe el sonido, que en el ecograma se muestra irregular.

F2xS6

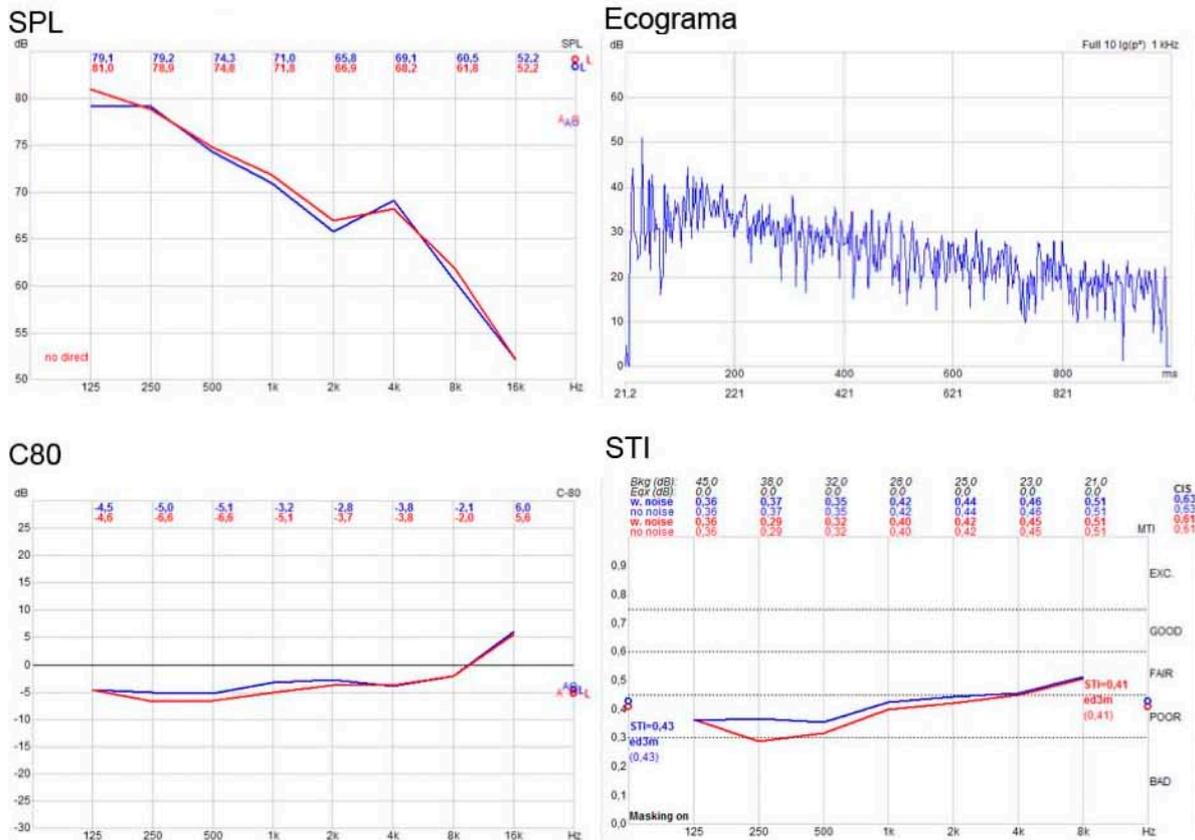


Figura 5-11. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S6 con la fuente F2.

El punto S6 (Figura 5-11) en este caso está a la espalda de la emisión, por lo que no recibe sonido directo. El gráfico de SPL muestra una caída aún más marcada que en el caso anterior. Presenta el pico a los 4000 Hz que se aprecia en todos los gráficos anteriores. El nivel global en este caso llega hasta los 85 dBA.

El ecograma también muestra claramente el retardo con que llega el sonido a este punto, ya que al estar a la espalda y que el acceso a la estancia (que está en este lado) es reducido y está bastante elevado, las primeras reflexiones llegan, igual que en el caso anterior, a través de la pequeña ventana situada sobre la puerta de acceso. Este punto muestra también un primer instante irregular para posteriormente caer de forma lineal y bastante uniforme.

En este caso, el C80 y el STI tienen las dos curvas similares, no se da el mismo caso que con la emisión en F1. Las dos curvas son bastante planas en todas las frecuencias, en el caso del C80 dentro de los valores recomendados, al límite de estos, mientras que el STI resulta pobre. El motivo puede ser que los primeros instantes mostrados en el ecograma son bastante irregulares y, al alargarse más en el tiempo que en el caso anterior, provocan un STI inferior.

F2xS7

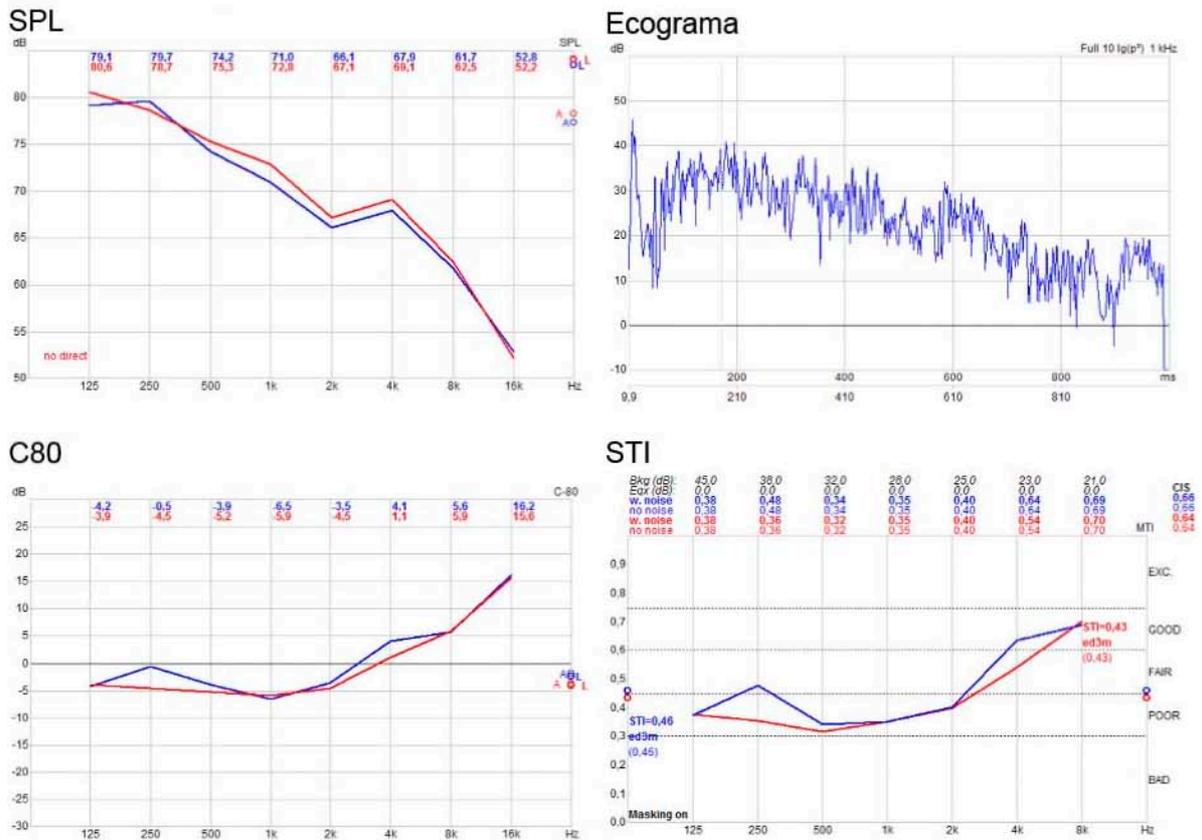


Figura 5-12. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S7 con la fuente F2.

En este caso, el punto S7 (Figura 5-12) está debajo de la emisión, a pesar de esto, por lo visto en los mapas, no se obtendrán resultados muy alejados de los anteriores. El gráfico SPL es muy similar al de la posición S6, marcada caída, valle en 2000 Hz y pico en 4000 Hz. Aun así, el nivel que se obtiene es muy similar al anterior, de aproximadamente 85 dBA.

La mayor diferencia está en el ecograma. La dirección de la emisión propicia que, sin un gran retardo, se reciba sonido y con gran nivel, reflejado en el ábside principal. Tras este sonido primero, hay una brusca caída, para luego presentar una subida paulatina y bajar posteriormente. La bajada no es continua, sino que escalonada, mostrando un tramo horizontal, una bajada, otro tramo horizontal a un nivel ligeramente más bajo, otra ligera caída, hasta que en los últimos instantes se da una subida brusca para bajar del mismo modo que ha subido.

Los gráficos de C80 y STI vuelven a presentar la misma tendencia que en los puntos anteriores, con un primer tramo horizontal y subida a partir de 2000 Hz. Una vez más, el resultado del C80 está dentro de los valores recomendados, y el STI resulta pobre. En esta posición tanto el C80 como el STI si que muestran una diferencia entre sus dos curvas a 250 Hz.

Todos los demás puntos siguen las pautas de los que se han analizado. Solamente hay uno que, respecto al punto contiguo, muestra unos resultados bastante diferentes. Se trata de la posición de medida S10 con la fuente F2, cerca del perímetro de la estancia superior del edículo central con la fuente en la misma estancia respecto al último punto analizado. Entre ambos puntos hay solamente 1,5 metros de distancia, pero en los resultados obtenidos (Figura 5-14) se traduce en grandes diferencias. La primera se observa en el gráfico de SPL, que presenta una gran diferencia entre el sonido directo y el reflejado. En este caso el nivel global es de algo menos de 95 dBA, 10 dBA menor que en la posición S9, diferencia que haría que fuera imperceptible si hubiera que sumar ambos.

Mientras, el ecograma es completamente diferente al anterior. Se identifica la llegada de sonido directo y primeras reflexiones de los muros que al estar tan próximos llegan con poco retardo. Pero tras esto, el ecograma presenta una caída brusca, en los instantes hasta que se recibe el sonido reflejado en la bóveda y que recorre mayores distancias.

El C80 está ligeramente por encima de los valores recomendados, muy por debajo de los obtenidos en S9, y tiene una curva similar a todas las anteriores; mientras que la inteligibilidad es buena, cerca de excelente, algo peor que en el caso anterior, pero con una curva que sigue la misma tendencia que las anteriores, incluso siendo más plana.

F2xS10

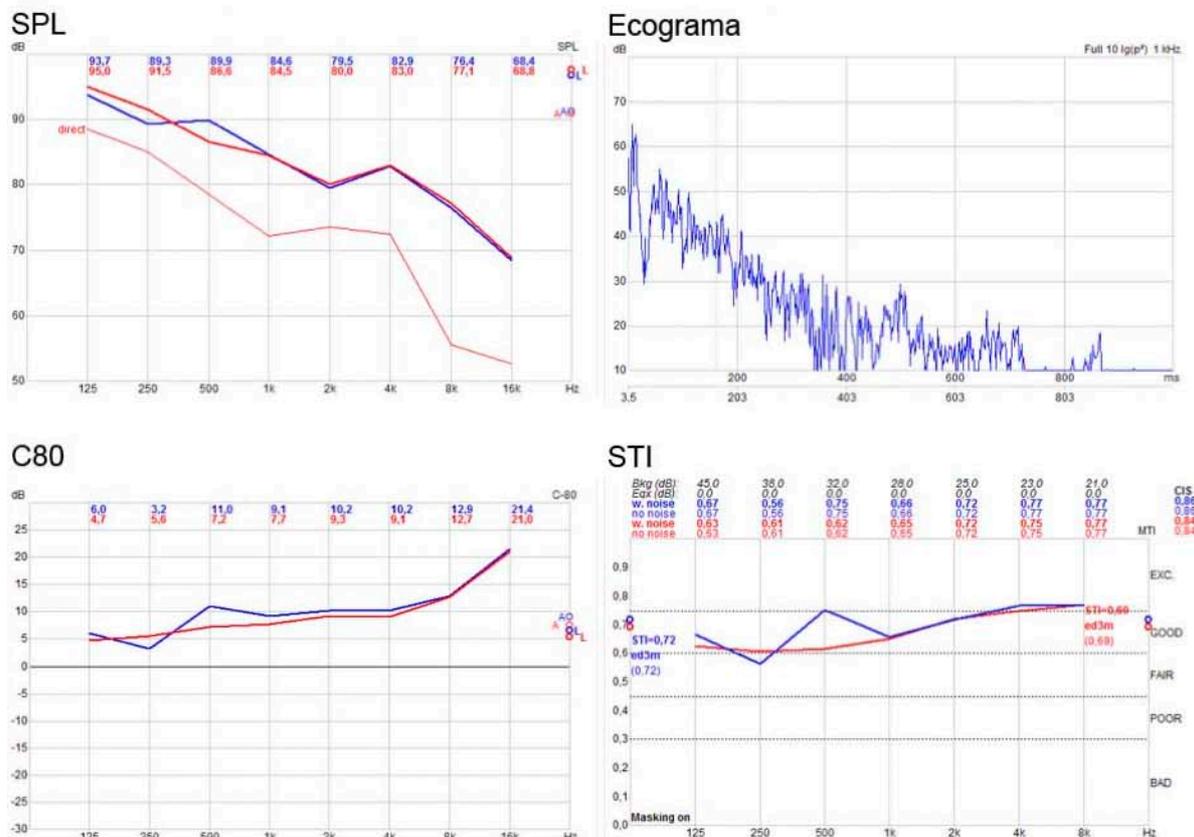


Figura 5-14. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S10 con la fuente F2.

Una vez realizado el recorrido por diferentes puntos de la iglesia, destacan diversos aspectos. El primero es la similitud de todos los parámetros entre unos puntos y otros, salvo contadas excepciones. Otro aspecto a destacar es el control del sonido reverberado en cada posición, que hace que, independientemente de que el sonido directo llegue o no, crea un mapa de nivel de presión sonora muy homogéneo. Y el tercer aspecto es que la claridad y la inteligibilidad presentan comportamientos contrarios uno al otro.

Todos los puntos, salvo el último punto, muy próximo a la fuente y ambos en una estancia muy pequeña, tienen unos niveles de C80 dentro de los valores recomendados. Por el contrario, solamente las posiciones S2 y S6 con la fuente F1 y la posición S9 para la fuente F2 tienen una inteligibilidad buena o excelente. Las posiciones con inteligibilidad buena para la fuente F1 se sitúan en el deambulatorio y en el eje longitudinal, que resulta ser el eje de simetría, y alineados con la fuente; mientras que para la posición F2 solamente el punto de recepción que está próximo a él tiene una inteligibilidad excelente.

5.6 Trazado de rayos

El trazado de rayos evidencia un planteamiento mencionado al principio del trabajo, en el que se suponía un comportamiento acústico simétrico de la iglesia y, por esto, la medición se realizó en una mitad de la iglesia, y explica algunas de las diferencias que se dan en los gráficos que se han mostrado en el apartado anterior.

Como se observa en los mapas en planta de los receptores que están en el eje longitudinal (Figura 5-15), eje en el que se encuentran también las fuentes, hay el mismo trazado de rayos en una mitad de la iglesia que en la otra. Además los dos rayos simétricos llegan en el mismo instante, por lo que no se escucharía con retardo en uno de los dos oídos.

Además, en los casos F2xS1, F2xS2 y F1xS7, que llegan pocos rayos a los receptores, se aprecia la larga distancia que tiene que recorrer alguno de ellos hasta llegar, con lo que supone de pérdida de nivel y de retardo.

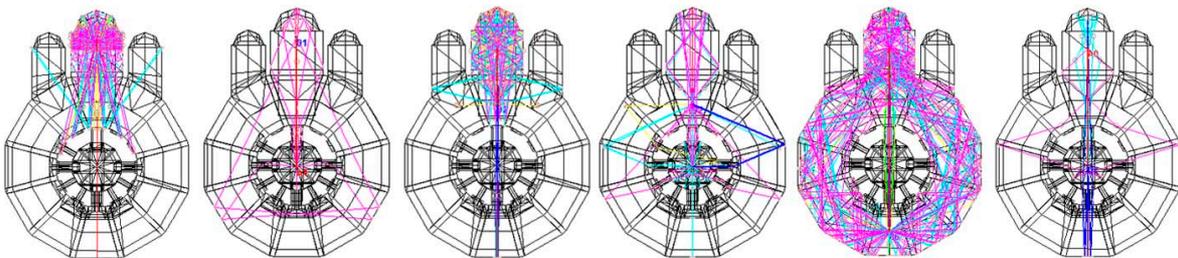


Figura 5-15. Planta del trazado de rayos de los casos F1xS1, F2xS1, F1xS2, F2xS2, F1xS6, F1xS7.

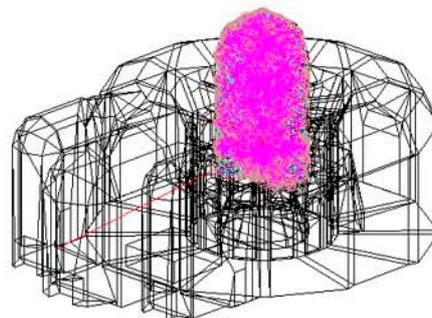
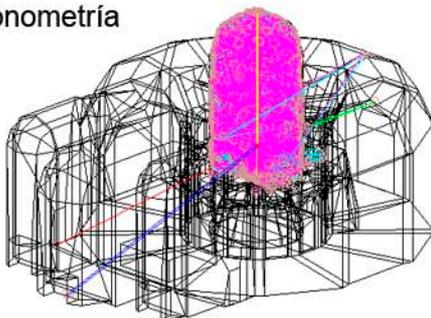
Observando el trazado de rayos y el espectrograma (Figura 5-16) que con él se muestra, se comprende la diferencia tan grande que hay entre dos puntos tan próximos físicamente. En la posición F2xS9 se reconoce el ecograma de la Figura 5-13, un alto nivel de sonido directo y, con cierto retardo, sonido de reflexiones con un nivel bastante inferior que no participa prácticamente en el nivel global.

Mientras que en la posición F2xS10, sobre los bancos en los que se sentarían los caballeros en las celebraciones, el sonido reflejado llega prácticamente con el mismo retardo pero con un nivel mucho mayor. Además se da otra diferencia importante, en la posición central (S9) llegan algunos rayos que han salido de la estancia y han recorrido grandes distancias, mientras que a la posición perimetral (S10) sólo llegan reflexiones del interior de la estancia. Además el espectrograma muestra cómo no por sufrir mayor número de reflexiones un rayo de orden 5 tiene que llegar necesariamente con mayor retardo que uno de orden 4 ó 3. Ambos presentan rayos de orden 1 que llegan al receptor con mucho más retardo que algunos de orden 2, incluso con más retardo que rayos que han sufrido 3 y hasta 4 reflexiones.

F2xS9

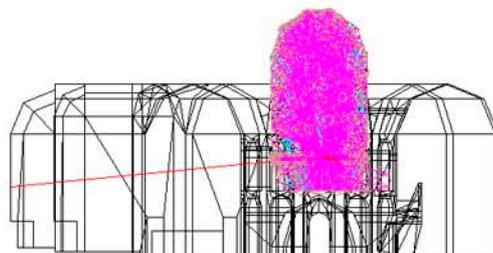
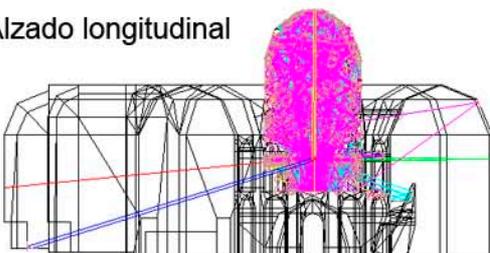
F2xS10

Axonometría



Order
0
1
2
3
4
5

Alzado longitudinal



Espectrograma

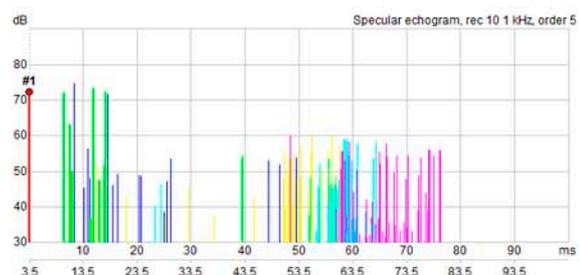
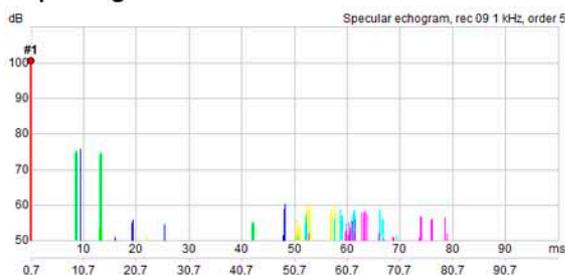


Figura 5-16. Comparativa del trazado de rayos y espectrograma obtenidos en las posiciones S9 y S10 para la fuente F2.

Esta herramienta verifica una vez más la función acústica de las ocho ventanas que comunican la estancia superior del edículo central con el deambulatorio (Figura 5-17). Para cada receptor que está fuera de la estancia superior del edículo central, emitiendo desde esta, siempre hay rayos que salen por estas ventanas y llegan al punto de recepción. Además, en el alzado se aprecia a la altura de las ventanas una zona de color cian, esto es porque en esta zona no se reflejan rayos hacia el interior, como si que se produce en las demás zonas y se colorea todo de magenta.

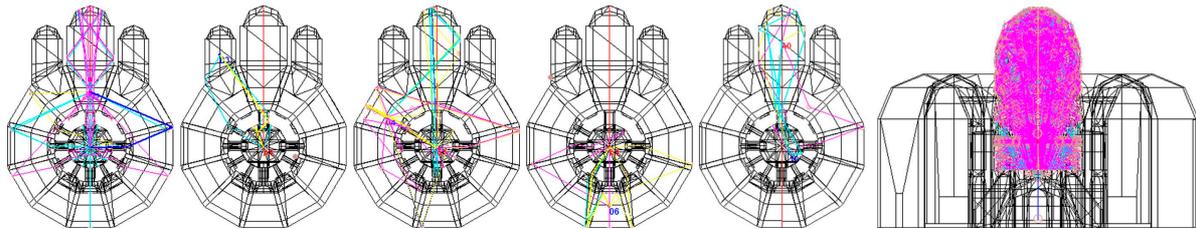


Figura 5-17. Planta del trazado de rayos en los casos F2xS2, F2xS3, F2xS4, F2xS6 y F1xS10; alzado F2xS10.

5.7 Vídeos de propagación

La última herramienta empleada para observar el comportamiento acústico de la iglesia ha sido el video que muestra la propagación del sonido desde la fuente. Estos vídeos evidencian la propagación homogénea por todo el recinto, mostrando cómo, emitiendo desde la posición de fuente F1, el sonido abarca todo el deambulatorio y lo recorre en ambos sentidos (Figura 5-18). Además se aprecia que, emitiendo desde la posición F2, a los 10 ms. las ventanas ya tienen rayos que están saliendo al deambulatorio y que posteriormente se reparten por el mismo.

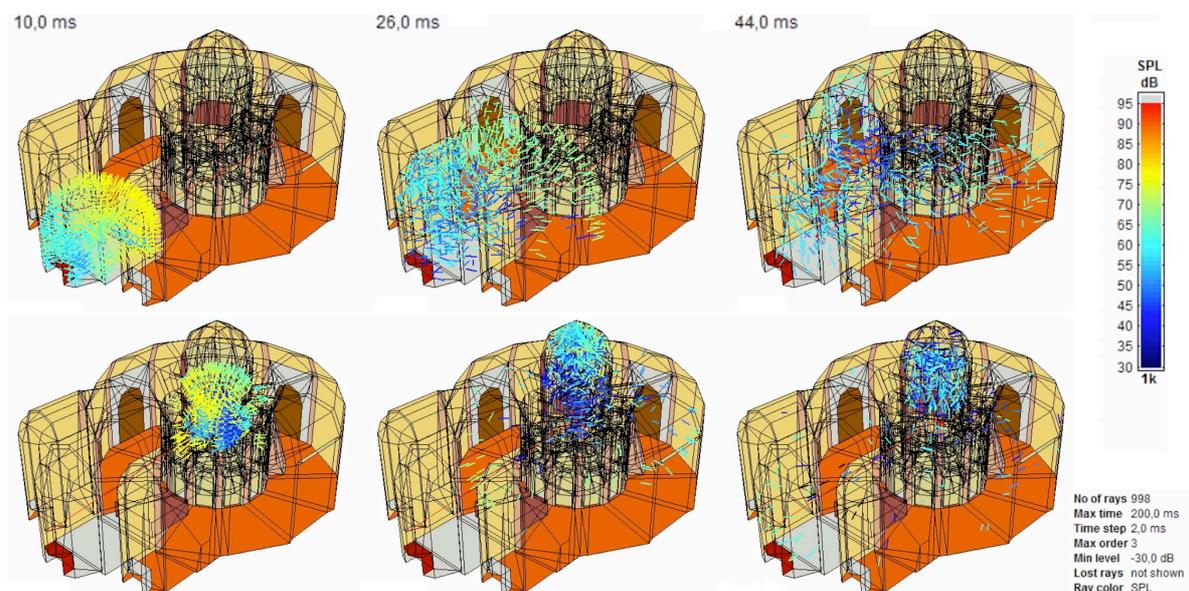


Figura 5-18. Capturas de los vídeos de propagación de las fuentes F1, arriba, y F2, abajo.

6 CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis de los resultados se debe volver al inicio del trabajo para comprobar si se han cumplido los objetivos marcados al principio y si las hipótesis lanzadas estaban en lo cierto:

- Primer objetivo: saber si la geometría tiene función acústica.
- Segundo objetivo: saber si el recinto es más apropiado para las celebraciones en las que se entonara algún tipo de canto o si por el contrario tiene un comportamiento más acorde a las necesidades de la emisión de la palabra.
- Tercer objetivo: saber si para alguna de las dos posibles posiciones de fuente se obtenían mejores resultados o las dos presentaban resultados apropiados.

- Primera hipótesis: la iglesia muestra un comportamiento acústico simétrico respecto del eje longitudinal este-oeste.
- Segunda hipótesis: existe una función acústica de las ocho ventanas que comunican la estancia superior del edículo central y el deambulatorio.

En cuanto a las hipótesis, ambas estaban en lo cierto. El comportamiento acústico simétrico es claro y no depende ni del retablo ubicado en el lienzo norte ni de la portada del lienzo sur. Además los huecos tanto en la estancia inferior como en la superior del edículo central en el eje norte-sur potencia este hecho.

Por otra parte, las funciones de las ocho ventanas son las que se suponían, tanto enviar el sonido al deambulatorio para que no se acumulara en exceso en la estancia y para crear un campo acústico homogéneo, y permitir la entrada de sonido reflejado cuando la emisión se realiza desde el ábside principal.

La conclusión que responde al primer objetivo es clara. La geometría sí que tiene función acústica. Se ha comprobado tanto en los mapas de nivel de presión acústica como en los gráficos del mismo en función de la frecuencia y en las imágenes del trazado de rayos. La geometría potencia el sonido aportando niveles muy altos de sonido reverberado y permite que el sonido llegue y salga de la estancia superior del edículo central.

La respuesta para el segundo objetivo se obtiene en los gráficos de C80 y STI en los receptores y los mapas de los mismos parámetros. En los mapas se observa que ambos dependen de la recepción o no de sonido directo. Mientras que la mayoría de los receptores presentaban resultados más apropiados para la comprensión de emisiones musicales o cantos; mientras que, salvo excepciones, se obtienen resultados pobres en cuanto a la claridad de la palabra.

En cuanto a la posición de emisión que mejores resultados aporta, ninguna de las dos presenta resultados mucho mejores que la otra. Obviamente la emisión desde el edículo central causa un nivel de potencia sonora menor, al ser una estancia comunicada puntualmente con el deambulatorio. Sin embargo, se han obtenido resultados mejores de lo que cabía esperar en cuanto a nivel de presión sonora y claridad.

Estas tres conclusiones permiten afirmar que en la iglesia se realizaban en su mayoría eventos en los que se entonaba canto gregoriano. Los actos de palabra se reducen al nombramiento de nuevos caballeros, en los que el número de asistentes era reducido y se ubicaban delante del altar principal; y el velado de las armas, realizado en el altar de la estancia superior del edículo central y con los caballeros sentados en los bancos del perímetro.

Pero la conclusión más importante es la relativa a la geometría. Esta geometría no solo responde a la función de este tipo de iglesias, dedicadas a fines martiriales o sepulcrales, sino que tiene funciones acústicas, siendo recintos más que aceptables para la realización de dichos eventos, solemnes y con alta presencia de oraciones cantadas.

Esta conclusión permite plantear una vía de investigación a partir de la cual intentar justificar la geometría de este tipo de iglesias que, como se ha visto en el segundo apartado, cada una es única y tiene singularidades y características propias.

El estudio acústico de este tipo de templos puede desbloquear la investigación sobre los mismos, como ocurría con la iglesia de la Vera Cruz, de la cual hay muchos escritos pero en ninguno de ellos se habla de la acústica. Incluso, mencionan elementos de la iglesia, como son las ocho ventanas del edículo central, afirmando que no se conoce su función, y en este trabajo se ha encontrado.

Además, el conocimiento del comportamiento acústico de este tipo de recintos ayudaría a clasificarlos en diferentes grupos dependiendo de si pueden contar con uno o varios puntos de emisión, si la emisión es mejor entonando cantos o de palabra, y no todos en el grupo genérico de "iglesia-rotonda". Así se conocería realmente la función de la iglesia de Santa María de Eunate, la Capilla Palatina de Aquisgrán, la iglesia de Santa Constanza o las del Santo Sepulcro en Jerusalén y Cambridge.

Para finalizar, cabe resaltar la gran homogeneidad de parámetros que se da en todo el deambulatorio, provocado simplemente con la geometría, haciéndola una iglesia aún más extraordinaria, en un templo de principios del siglo XIII, cuando los conocimientos acústicos eran mínimos; mientras que actualmente con el amplio conocimiento de la acústica, habiéndola dividido incluso en tres partes –acústica geométrica, estadística y ondulatoria- se recurre constantemente a las ayudas electrónicas para sonorizar espacios mucho más simples geoméricamente hablando.

BIBLIOGRAFÍA¹

AA.VV. (2002). *CATT-Acoustic v8.0*. Gothenburg.

AA.VV. (2001). *Patrimonio mundial de la humanidad*. Vol I. *Islas Atlánticas, Península Ibérica y Baleares*. Madrid: Rueda.

AA.VV. (2007). Enciclopedia del Románico. Segovia, Tomo III. Recuperado de <http://www.romanicodigital.com/detalle-Pdf.aspx?archivo=SEGOVIA%20III&localidad=SEGOVIA>

Álvarez Mora, A, et al. (1994). *Historia Del Arte De Castilla Y León*. Tomo II. *Arte Románico*. Valladolid: Ámbito.

Bednorz, A. (1996). *El Románico*. Colonia: Könemann.

Cedillo, López de Ayala y Álvarez de Toledo, J. Conde de. (2010). “La iglesia de Vera-Cruz en Segovia”. *Boletín de la Real Academia de la Historia*, 74 (1919). Recuperado de <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmc7bmcd3c4>

Castán Lanaspá, J. (1990). *El arte románico en las Extremaduras de León y Castilla*. Valladolid: Junta de Castilla y León, Consejería de Cultura y Bienestar Social.

De Lojendio, L. M. y Rodríguez, A. (1985). *La España románica*. Vol. 3. *Castilla /2*. Vitoria: Encuentro Ediciones.

García Atienza, J. (1995). *Los Enclaves templarios*. Barcelona: Martínez Roca.

Gómez García, G. (Ed.). (2013). *Iglesias y Santuarios de la Orden de Malta en España*.

Lenoir, M. A. (1852). *Architecture Monastique*, París: Imprimerie Nationale. [Online].
Avaliable: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5408464r>

Llinares, J., Llopis, A. y Sancho, J. (1991). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

¹ La bibliografía sigue las pautas marcadas por la 6ª Edición American Psychological Association.

Merino de Cáceres, J. M. (1998). *La Iglesia de la Vera-Cruz de Segovia. Conocida como de los Templarios*. Segovia: Academia de Historia y Arte de San Quirce.

Pijoán, J. (1973). *Summa Artis. Historia General del Arte*. Vol. IX. *El Arte Románico. Siglos XI y XII*. Madrid: Espasa-Calpe.

Rolf Toman, Espérazza (Ed.). (1996). *El románico: arquitectura, escultura y pintura*. Colonia: Könemann.

Exposición: *El legado hospitalario: 900 años de la Orden de Malta en España*. Iglesia Vera-Cruz, 2015, Segovia.

Referencias digitales de imágenes

<http://www.arteguias.com/catedral/capillapalatinaaquisgran.htm>

<http://plantacentral.wix.com/home#!reini-unido---cambridge/c1rl4>

http://www.circulo-romanico.com/foro_club_del_romanico/viewtopic.php?f=2&t=473

<https://understandingrome.wordpress.com/>

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S1 CON LA FUENTE F1.....	134
FIGURA 2. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S2 CON LA FUENTE F1.....	135
FIGURA 3. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S3 CON LA FUENTE F1.....	136
FIGURA 4. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S4 CON LA FUENTE F1.....	137
FIGURA 5. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S6 CON LA FUENTE F1.....	138
FIGURA 6. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S7 CON LA FUENTE F1.....	139
FIGURA 7. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S8 CON LA FUENTE F1.....	140
FIGURA 8. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S9 CON LA FUENTE F1.....	141
FIGURA 9. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S10 CON LA FUENTE F1.....	142
FIGURA 10. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S1 CON LA FUENTE F2.....	143
FIGURA 11. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S2 CON LA FUENTE F2.....	144
FIGURA 12. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S3 CON LA FUENTE F2.....	145
FIGURA 13. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S4 CON LA FUENTE F2.....	146
FIGURA 14. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S6 CON LA FUENTE F2.....	147
FIGURA 15. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S7 CON LA FUENTE F2.....	148
FIGURA 16. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S8 CON LA FUENTE F2.....	149
FIGURA 17. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S9 CON LA FUENTE F2.....	150
FIGURA 18. GRÁFICOS SPL, C80, STI, ECOGRAMA, TRAZADO DE RAYOS Y ESPECTOGRAMA OBTENIDOS EN EL RECEPTOR S10 CON LA FUENTE F2.....	151

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES POR FRECUENCIAS Y NIVEL EQUIVALENTE ($L_{Aeq, 10s}$) EN CADA POSICIÓN DE MEDIDA CON LA FUENTE EN LA POSICIÓN F1.	131
GRÁFICO 2. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES POR FRECUENCIAS Y NIVEL EQUIVALENTE ($L_{Aeq, 10s}$) EN CADA POSICIÓN DE MEDIDA CON LA FUENTE EN LA POSICIÓN F2.	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. PLANTA CON LAS PROPORCIONES Y LOS TRIÁNGULOS EQUILÁTEROS QUE LA CONFORMAN. FUENTE: MERINO DE CÁCERES, 1991.	117
ILUSTRACIÓN 2. SECCIÓN TRANSVERSAL, EJE NORTE SUR, CON LAS PROPORCIONES RADIALES Y EL TRIÁNGULO EQUILÁTERO QUE LA CONFORMAN, Y CON EL SUPUESTO ESTADO ORIGINAL DE LA CRIPTA. FUENTE: MERINO DE CÁCERES, 1991.	118
ILUSTRACIÓN 3. ALZADO ESTE. FUENTE: AA. VV, 2007.	119
ILUSTRACIÓN 4. ALZADO SUR. FUENTE: AA. VV, 2007.	120
ILUSTRACIÓN 5. ALZADO ESTE. FUENTE: AA. VV, 2007.	121
ILUSTRACIÓN 6. PRIMERA PÁGINA (DE 9) DEL INFORME DEL CONDE DE CEDILLO EN EL QUE CONCLUÍA QUE ERA ACERTADO CATALOGAR LA IGLESIA COMO MONUMENTO NACIONAL. FUENTE: CEDICO, CONDE DE, 2010.	122
ILUSTRACIÓN 7. COMPARATIVA DEL MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN DE ÁBSIDE PRINCIPAL, DE LA CONSTRUCCIÓN ORIGINAL, DE MAMPOSTERÍA, IZQUIERDA; Y LA TORRE, DE CONSTRUCCIÓN POSTERIOR, DE SILLERÍA Y CON BASE DE GRANITO, DERECHA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	123
ILUSTRACIÓN 8. COMPARATIVA DEL MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN, CORNISA Y FORMACIÓN DE HUECOS ENTRE LA CONSTRUCCIÓN ORIGINAL, CON PIEDRA LABRADA, IZQUIERDA; Y LA SACRISTÍA, DE CONSTRUCCIÓN POSTERIOR, CON LADRILLO DE ARCILLA, DERECHA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	123
ILUSTRACIÓN 9. PORTADAS DE LA IGLESIA: LA OESTE, MÁS ELABORADA, IZQUIERDA; Y LA SUR, MÁS SIMPLE, DERECHA. EN EL CENTRO, ARRIBA, CRUZ DE OCHO PUNTAS O BEATITUDES DE LA ORDEN DE MALTA; ABAJO, CRUZ PATRIARCAL O DE CARAVACA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.....	124
ILUSTRACIÓN 10. MUROS DE LA SUPUESTA CRIPTA ANTIGUA, EXTERIOR A LA IGLESIA, IZQUIERDA; EXCAVACIONES DE SEPULTURAS EN EL RINCÓN QUE FORMAN EL ÁBSIDE NORTE Y LA SACRISTÍA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	124
ILUSTRACIÓN 11. OCHO BANDERAS DE LAS OCHO LENGUAS DE LA ORDEN DE MALTA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.	125
ILUSTRACIÓN 12. BÓVEDA DE CRUCERÍA DE LA ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL, IZQUIERDA; COMPARATIVA DE ALTURA DE LAS COLUMNAS SOBRE LAS QUE DESCANSAN LOS ARCOS DE LA BÓVEDA DE CRUCERÍA DE ESTA ESTANCIA Y LOS ARCOS FAJONES DEL DEAMBULATORIO, A LA MISMA ALTURA. ESTE HECHO SIRVE A MERINO DE CÁCERES PARA SUPONER QUE EL NIVEL ORIGINAL DE ESTA ESTANCIA	

ESTABA MÁS ABAJO, AL NO TENER LAS COLUMNAS DE LA ESTANCIA INFERIOR SU BASAMENTO A LA VISTA.....	125
ILUSTRACIÓN 13. ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL, SUELO DE BALDOSA DE ARCILLA Y BANCOS EN EL PERÍMETRO, LUGAR EN EL QUE SE OBTIENE MEJOR RESULTADO ACÚSTICO, IZQUIERDA; LÁPIDAS DE GRANITO FRENTE AL ALTAR PRINCIPAL, DERECHA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.....	125
ILUSTRACIÓN 14. ESCALERA DE ACCESO A LA ESTANCIA SUPERIOR, ADOSADA TORPEMENTE AL MURO. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.....	125
ILUSTRACIÓN 15. MARCAS DE ANTIGUA CERRAJERÍA EXISTENTE EN LOS DOS HUECOS MAYORES DE LA ESTANCIA SUPERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL. HUECO ESTE, ASOMANDO AL ALTAR PRINCIPAL, IZQUIERDA; HUECO POR EL QUE SE ACCEDE A TRAVÉS DE LA ESCALERA, DERECHA. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.....	126
ILUSTRACIÓN 16. ARRIBA, FOTOGRAFÍAS DE LOS ÁBSIDES, EL PRINCIPAL, CENTRO, VISTO DESDE EL ALTAR SUPERIOR. ABAJO, PANORÁMICA DESDE LA POSICIÓN DE LA AUDIENCIA FRENTE AL ALTAR PRINCIPAL. FOTOGRAFÍAS PROPIAS.....	126
ILUSTRACIÓN 17. FOTOGRAFÍAS DE MATERIALES: A) SUELO DE GRANITO DEL ÁBSIDE PRINCIPAL Y DEAMBULATORIO FRENTE AL ÁBSIDE, CON LÁPIDAS; B) SUELO DE GRANITO DE ESTANCIA INFERIOR DEL EDÍCULO CENTRAL; C) BÓVEDA DE LA ESTANCIA INFERIOR, MUROS Y ARCOS DE PIEDRA Y BÓVEDA GUARNIZADA; D) MURO DEL EDÍCULO CENTRAL DE PIEDRA VISTA; E) CARA INTERIOR DEL MURO EXTERIOR DEL DEAMBULATORIO GUARNIZADO PINTADO; F) ALTAR ORNAMENTADO CON PAÑO DE TERCIOPELO; G) LIENZO DE PORTADA OESTE DE PIEDRA VISTA Y PUERTA DE MADERA, MISMO CASO QUE EN LA PORTADA SUR; H) EDÍCULO CENTRAL DE PIEDRA VISTA, BÓVEDA DEL DEAMBULATORIO GUARNIZADA Y ARCOS DE PIEDRA VISTA; I) COLUMNAS SOBRE LAS QUE DESCANSAN LOS ARCOS DEL DEAMBULATORIO DE PIEDRA VISTA; J) SUELO DEL DEAMBULATORIO DE BALDOSA DE ARCILLA.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TABLA DE MATERIALES, CON EL MATERIAL BASE DE LA BIBLIOTECA DE CATT ACOUSTIC A PARTIR DEL QUE SE HA CREADO, SU DESCRIPCIÓN Y SUS CUALIDADES DE ABSORCIÓN Y DIFUSIÓN ACÚSTICA.....	127
TABLA 2. TIEMPO DE REVERBERACIÓN MEDIDO MEDIANTE LA EXPLOSIÓN DE GLOBOS. VALORES FINALMENTE DESECHADOS.....	129
TABLA 3. TIEMPO DE REVERBERACIÓN MEDIDO MEDIANTE LA INTERRUPCIÓN DE LA EMISIÓN DE LA FUENTE, CON LOS 13 SEGUNDOS EN EL ÁBSIDE LATERAL (S3) A 200 HZ.....	129
TABLA 4. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES MEDIDOS EN LOS 10 PUNTOS DE RECEPCIÓN CON LA POSICIÓN DE FUENTE EN F1.....	130
TABLA 5. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES MEDIDOS EN LOS 10 PUNTOS DE RECEPCIÓN CON LA FUENTE EN LA POSICIÓN F1.....	132

ANEXO I: DOCUMENTACIÓN PREVIA

Planimetría Merino de Cáceres

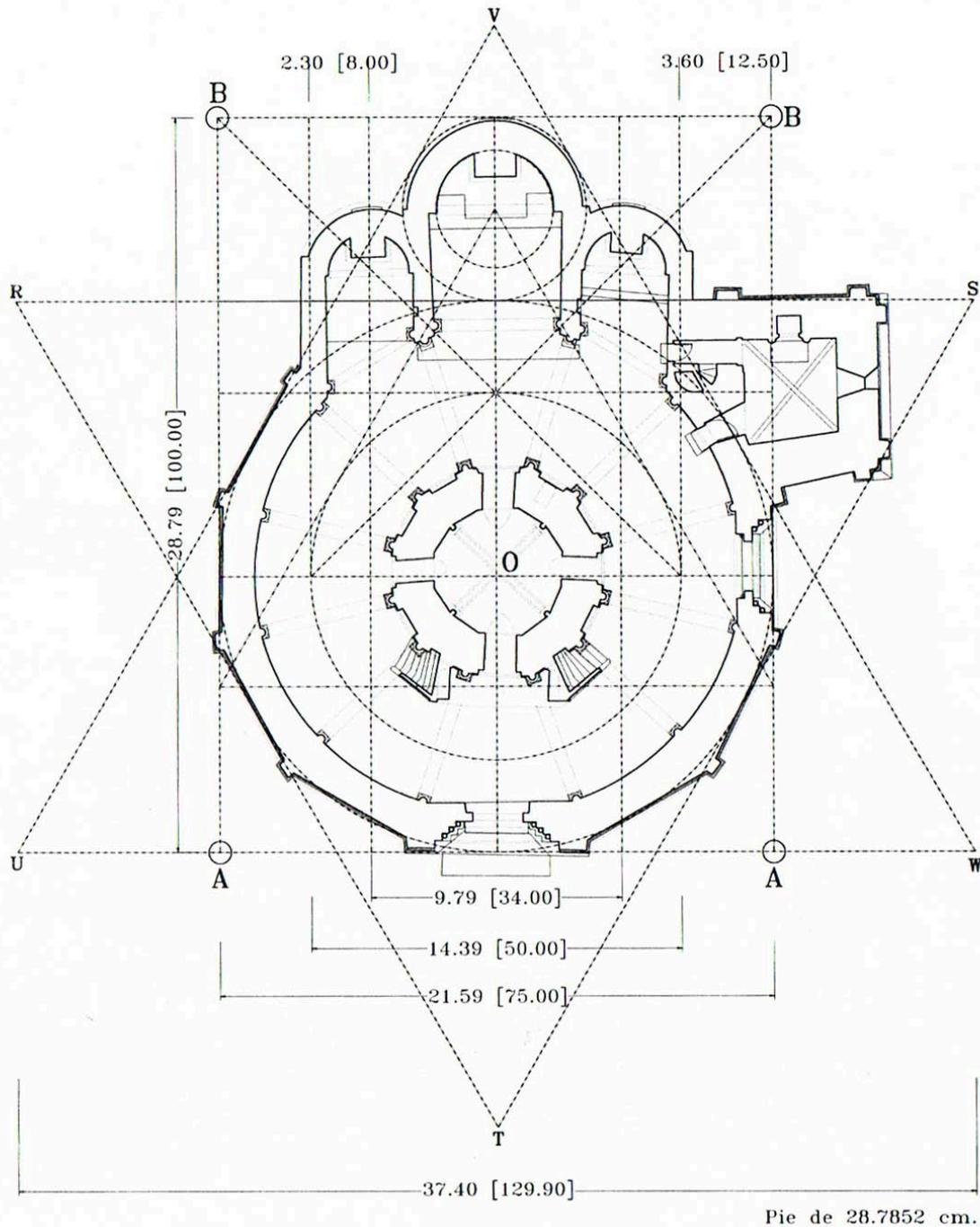


Ilustración 1. Planta con las proporciones y los triángulos equiláteros que la conforman. Fuente: Merino de Cáceres, 1991.

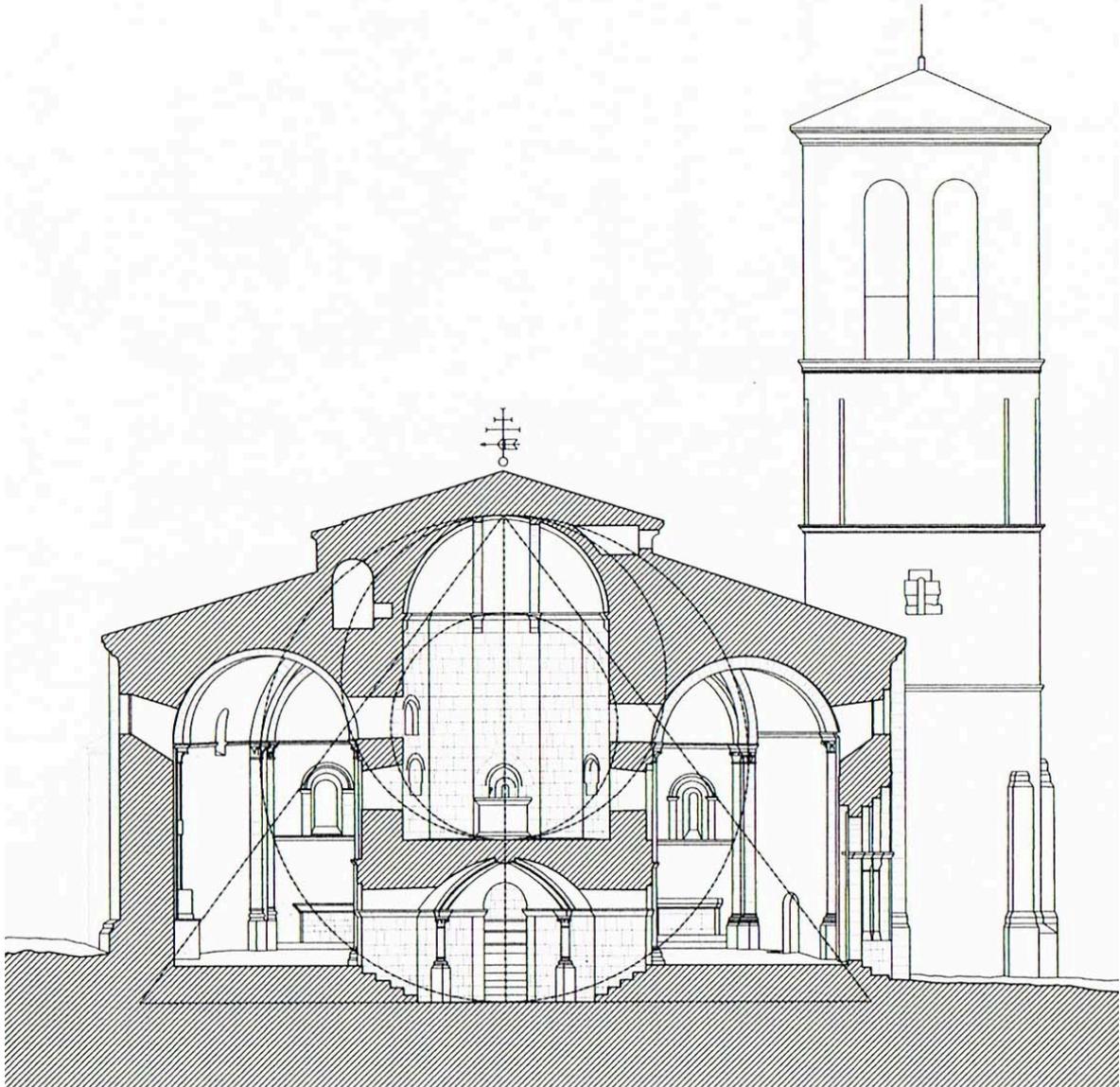


Ilustración 2. Sección transversal, eje norte sur, con las proporciones radiales y el triángulo equilátero que la conforman, y con el supuesto estado original de la cripta. Fuente: Merino de Cáceres, 1991.

Alzados Enciclopedia del Románico

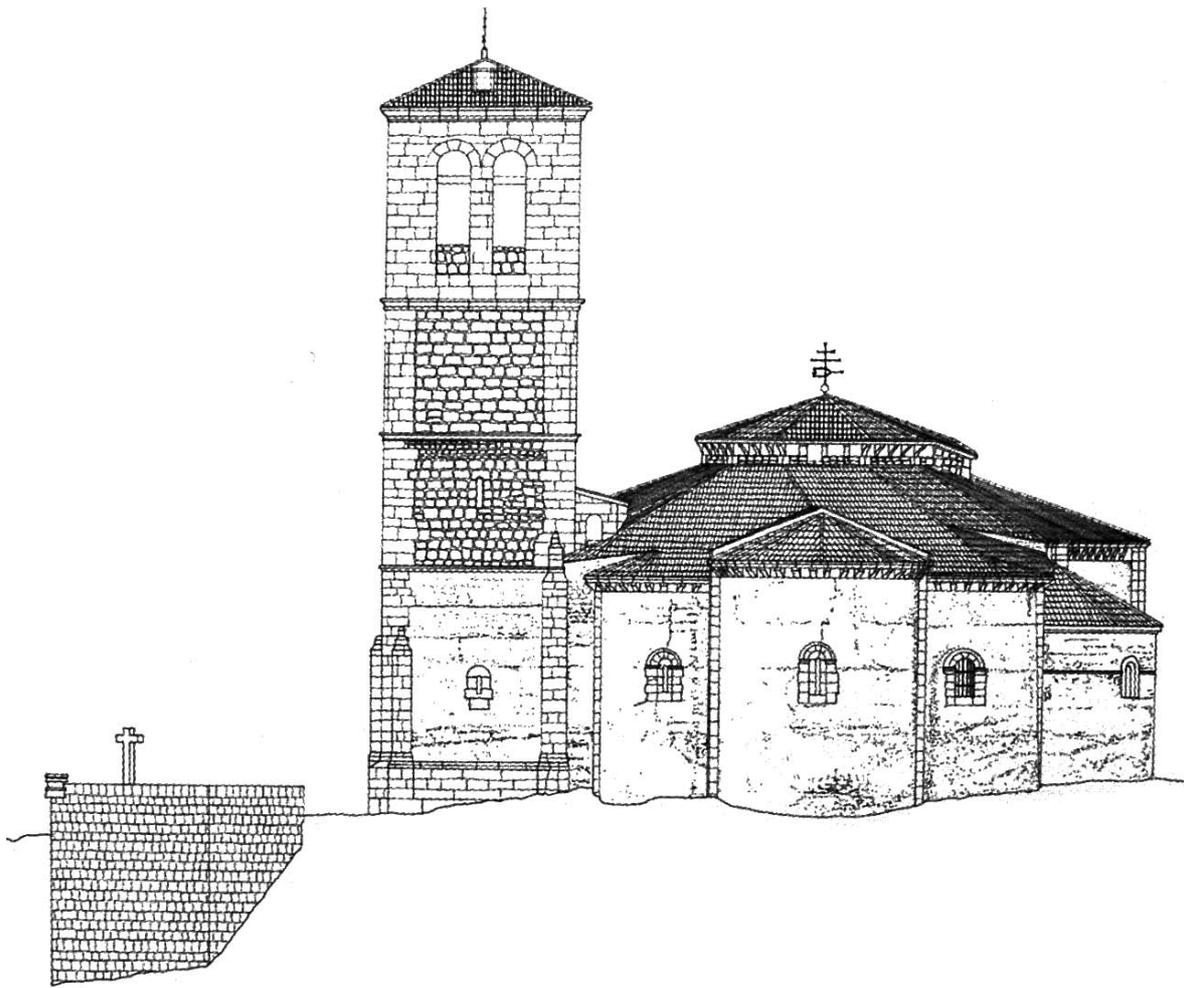


Ilustración 3. Alzado este. Fuente: AA. VV, 2007.

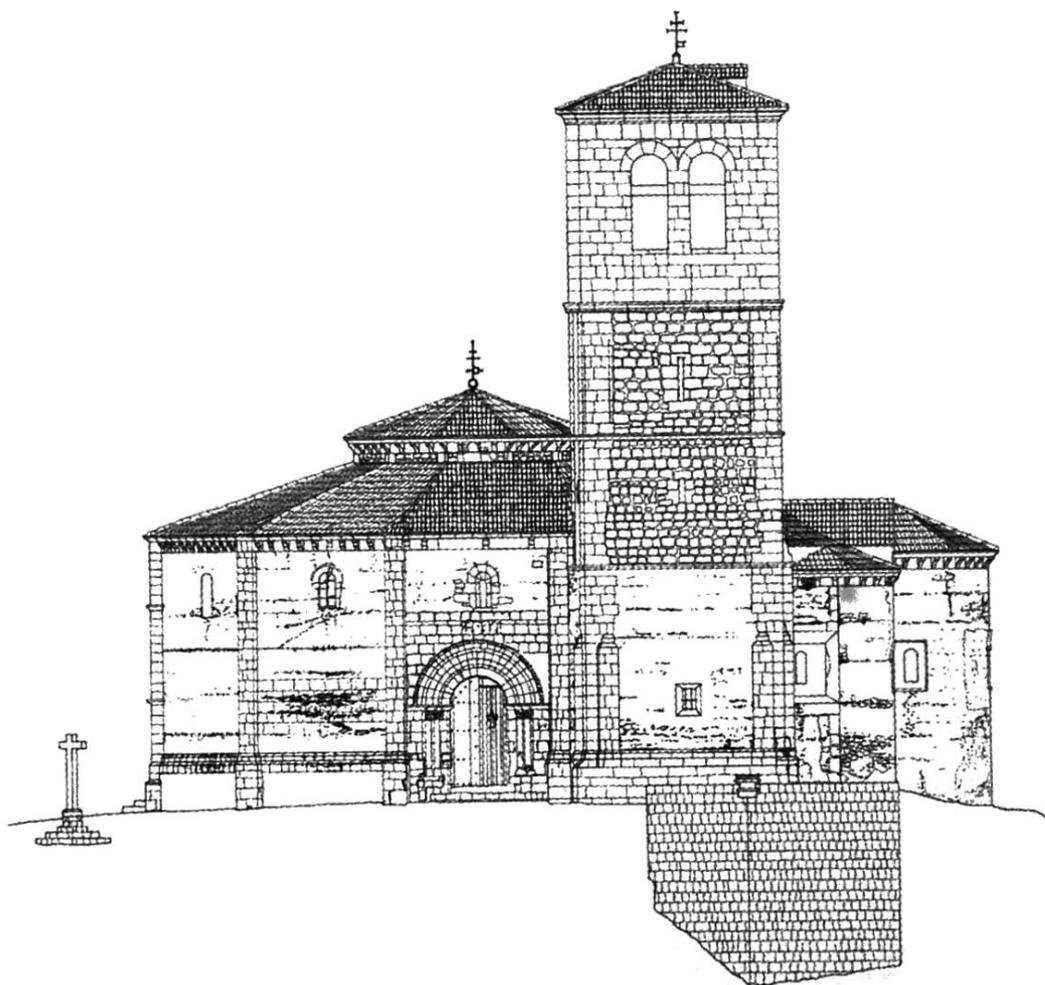


Ilustración 4. Alzado sur. Fuente: AA. VV, 2007.

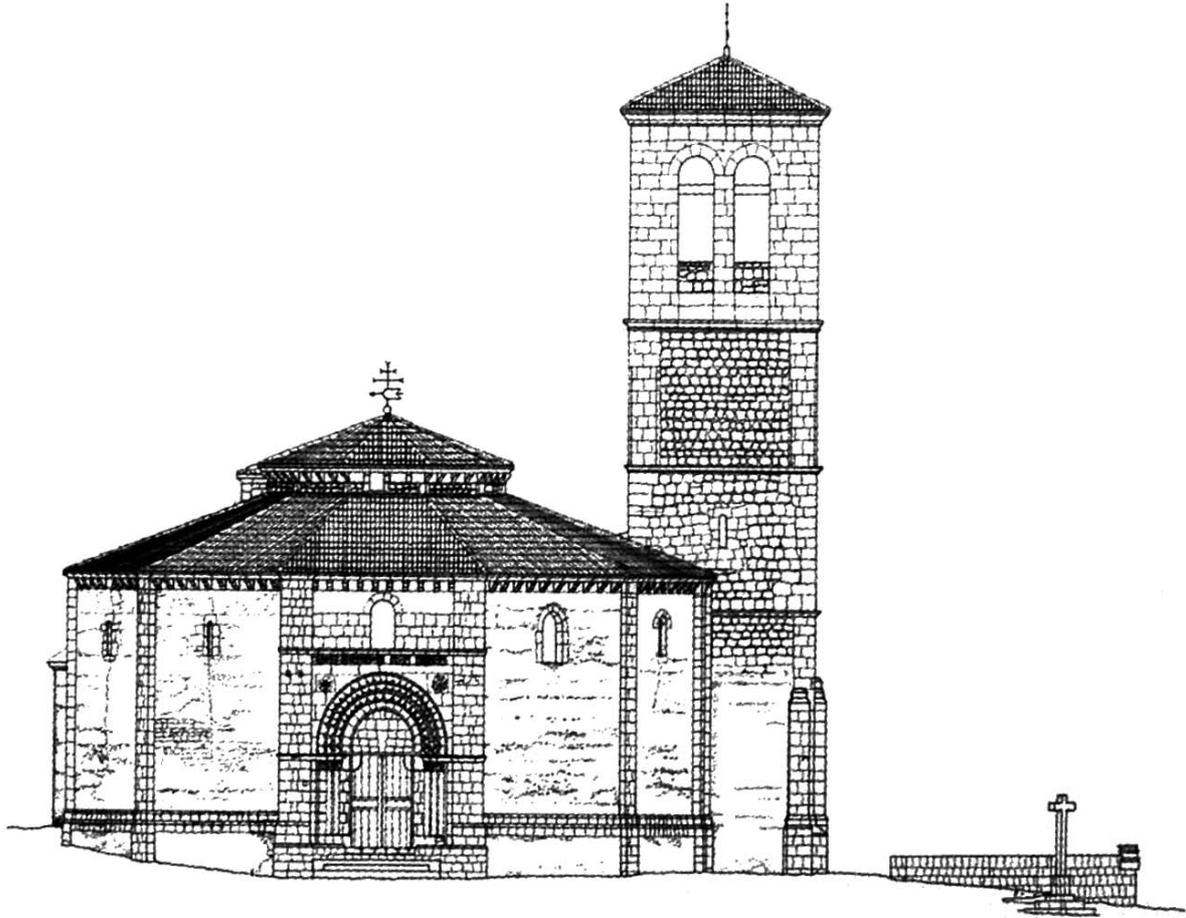


Ilustración 5. Alzado este. Fuente: AA. VV, 2007.

Informe del Conde de Cedillo

TOMO LXXIV

Abril, 1919

CUADERNO IV

BOLETÍN

DE LA

REAL ACADEMIA DE LA HISTORIA

INFORMES OFICIALES

I

LA IGLESIA DE LA VERA-CRUZ EN SEGOVIA

Habiéndome sido comunicada, con fecha 18 del pasado mes de Febrero, mi designación para informar acerca de la comunicación que dirige al Excmo. Sr. Director de la Academia el Excelentísimo Sr. Obispo de Segovia, sobre conveniencia de declaración de monumento nacional de la iglesia de la Vera-Cruz de aquella capital, en cumplimiento de mi encargo, tengo el honor de someter á la consideración y aprobación de la Academia el siguiente proyecto de informe:

«A unos dos kilómetros al NO. del centro de Segovia, y dentro de su término municipal, próximo al suburbio de San Marcos, sito á la derecha del río Eresma, y no lejos del pequeño pueblo de Zamarramala, yérguese en un recuesto «un santuario sin culto, solitario y misterioso, donde el arqueólogo y el poeta pueden estudiar y soñar de consuno» (1); es la iglesia en lejanos días dicha del Santo Sepulcro, y poco más tarde, de la Vera-Cruz, y vulgarmente conocida por *Los Templarios*.

(1) Lampérez: *Historia de la Arquitectura Cristiana Española en la Edad Media*, tomo I (Madrid, 1908), pág. 499.

Ilustración 6. Primera página (de 9) del informe del Conde de Cedillo en el que concluía que era acertado catalogar la iglesia como Monumento Nacional. Fuente: Cedico, Conde de, 2010.

ANEXO II. FOTOGRAFÍAS DE LA IGLESIA



Ilustración 7. Comparativa del método de construcción de ábside principal, de la construcción original, de mampostería, izquierda; y la torre, de construcción posterior, de sillería y con base de granito, derecha.

Fotografías propias.



Ilustración 8. Comparativa del método de construcción, cornisa y formación de huecos entre la construcción original, con piedra labrada, izquierda; y la sacristía, de construcción posterior, con ladrillo de arcilla, derecha.

Fotografías propias.



Ilustración 9. Portadas de la iglesia: la oeste, más elaborada, izquierda; y la sur, más simple, derecha. En el centro, arriba, cruz de ocho puntas o beatitudes de la Orden de Malta; abajo, cruz patriarcal o de Caravaca.

Fotografías propias.



Ilustración 10. Muros de la supuesta cripta antigua, exterior a la iglesia, izquierda; excavaciones de sepulturas en el rincón que forman el ábside norte y la sacristía. Fotografías propias.



Ilustración 11. Ocho banderas de las ocho lenguas de la Orden de Malta. Fotografías propias.

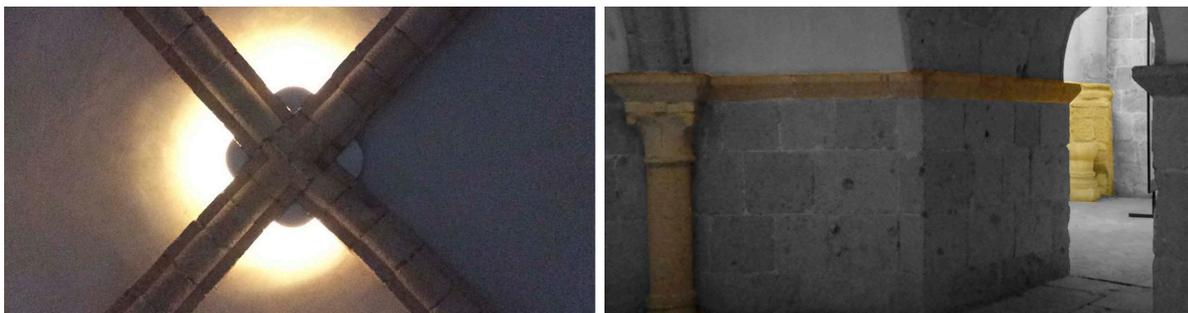


Ilustración 12. Bóveda de crucería de la estancia inferior del edículo central, izquierda; comparativa de altura de las columnas sobre las que descansan los arcos de la bóveda de crucería de esta estancia y los arcos fajones del deambulatorio, a la misma altura. Este hecho sirve a Merino de Cáceres para suponer que el nivel original de esta estancia estaba más abajo, al no tener las columnas de la estancia inferior su basamento a la vista.



Ilustración 13. Estancia superior del edículo central, suelo de baldosa de arcilla y bancos en el perímetro, lugar en el que se obtiene mejor resultado acústico, izquierda; lápidas de granito frente al altar principal, derecha. Fotografías propias.

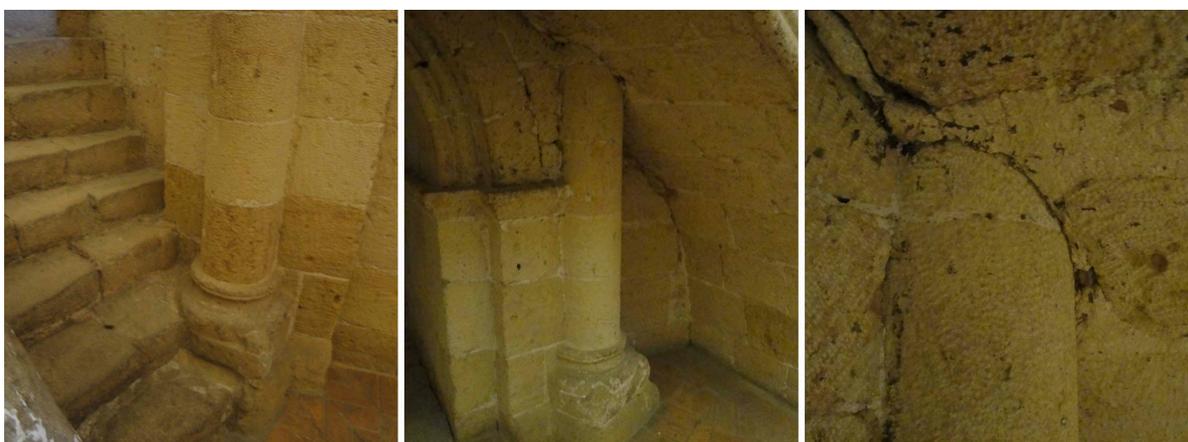


Ilustración 14. Escalera de acceso a la estancia superior, adosada torpemente al muro. Fotografías propias.



Ilustración 15. Marcas de antigua cerrajería existente en los dos huecos mayores de la estancia superior del edículo central. Huevo este, asomando al altar principal, izquierda; huevo por el que se accede a través de la escalera, derecha. Fotografías propias.



Ilustración 16. Arriba, fotografías de los ábsides, el principal, centro, visto desde el altar superior. Abajo, panorámica desde la posición de la audiencia frente al altar principal. Fotografías propias.

ANEXO III: MATERIALES CATT

Tabla 1. Tabla de materiales, con el material base de la biblioteca de CATT Acoustic a partir del que se ha creado, su descripción y sus cualidades de absorción y difusión acústica.

NOMBRE	MATERIAL CATT	ABSORCIÓN	DIFUSIÓN
	DESCRIPCIÓN		
Bancos	Wooden_door	14,10,6,8,10,10,10,10	-
	Massive wooden door		
Granito	Brick50	2,2,3,3,4,5,6,7	-
	Hard surfaces		
Guarnizado	Concrete_blk (modificado)	11,7,6,7,8,8,8,8	-
	Concrete wall with plaster painted		
Madera	Wooden_door	14,10,6,8,10,10,10,10	-
	Massive wooden door		
Piedra	Brick_wall1	3,3,3,4,5,7,9,11	-
	Brick wall, stuccoed with a rough finish		
Piedra Difusión	Brick_wall1 (+ difusión) Brick wall, stuccoed with a rough finish	3,3,3,4,5,7,9,11	40,50,60,70,80,80,80,80
Público	Audience70	24,40,78,98,96,87,78,69	30,40,50,60,70,70,70,70
	Seated audience on wooden chairs, ca. 2pers/m2		
Retablo	Wood30 (modificado +difusión)	10,9,9,6,6,6,6,6	40,50,60,70,80,80,80,80
	Wood, 25mm with airspace.		
Suelo	Concrete50	1,1,2,2,2,2,2,2	-
	Concrete or terrazzo		
Terciopelo	Taperstry80	17,40,70,86,84,82,80,78	-
	Taperstries 50mm from rigid wall		



Ilustración 17. Fotografías de materiales: a) suelo de granito del ábside principal y deambulatorio frente al ábside, con lápidas; b) suelo de granito de estancia inferior del edículo central; c) bóveda de la estancia inferior, muros y arcos de piedra y bóveda guarnizada; d) muro del edículo central de piedra vista; e) cara interior del muro exterior del deambulatorio guarnizado pintado; f) altar ornamentado con paño de terciopelo; g) lienzo de portada oeste de piedra vista y puerta de madera, mismo caso que en la portada sur; h) edículo central de piedra vista, bóveda del deambulatorio guarnizada y arcos de piedra vista; i) columnas sobre las que descansan los arcos del deambulatorio de piedra vista; j) suelo del deambulatorio de baldosa de arcilla.

ANEXO IV: RESULTADOS DE LA MEDICIÓN ACÚSTICA *IN SITU*

Tiempo de reverberación

Tabla 2. Tiempo de reverberación medido mediante la explosión de globos. Valores finalmente desechados.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN. Explosión de globo.						
SONOMETRO	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Frecuencia (Hz)\ld	34	35	36	37	38	39
50	0,96		0,50		0,68	0,89
63	0,33	0,96			0,91	
80	0,59	0,21			0,42	
100	0,84	0,29			0,18	0,31
125	0,64	0,38	0,54		0,57	0,95
160	0,57	0,71	0,29		0,73	0,10
200	0,66	0,40	0,36		0,67	0,29
250	0,60	0,83	0,66		0,73	0,35
315	0,65	0,70	0,24		0,41	0,50
400	0,60	0,67	0,65		0,59	0,75
500	0,75	0,74	0,80		0,76	0,51
630	0,68	0,65	0,81		0,75	0,69
800	0,76	0,86	0,76		0,70	0,51
1000	0,83	0,81	0,87		0,83	0,79
1250	0,89	0,81	0,84		0,87	0,80
1600	0,86	0,90	0,90		0,92	0,88
2000	0,87	0,94	0,90		0,95	0,93
2500	0,94	0,92	0,96		0,93	0,94
3150	0,93	0,96	0,95		0,96	0,96
4000	0,97	0,95	0,97		0,95	0,96
5000	0,98	0,97	0,97		0,97	0,97
Tr.Glob (segundos)	0,82	0,83	0,85	0,00	0,84	0,74

Tabla 3. Tiempo de reverberación medido mediante la interrupción de la emisión de la fuente, con los 13 segundos en el ábside lateral (S3) a 200 Hz.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN. Interrupción de emisión.						
SONOMETRO	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Frecuencia(Hz)\ld ⁴	44	42	46	48	50	52
50	0,19		0,63	0,06	0,46	0,23
63	3,08	0,09			0,11	
80	0,88	1,92			1,10	
100	0,58	6,32		5,47	7,88	7,90
125	2,18	3,20	3,00	5,02	4,58	0,04
160	2,53	3,92	3,81	4,39	4,70	4,05
200	4,21	6,58	13,00	5,71	3,12	6,69
250	3,00	3,48	3,52	4,47	3,57	6,25
315	3,74	2,87	5,29	4,04	3,46	4,22
400	2,97	3,62	4,00	2,32	4,06	2,71
500	3,10	3,98	5,79	3,53	3,79	3,83
630	3,84	4,30	3,55	4,11	3,13	3,72
800	3,40	3,48	3,13	3,18	3,05	3,41
1000	2,86	3,28	2,94	3,41	3,32	3,57
1250	2,78	3,34	3,23	3,28	2,85	2,91
1600	2,60	2,90	2,85	2,61	2,67	2,81
2000	2,50	2,63	2,62	2,52	2,54	2,57
2500	2,23	2,31	2,32	2,12	2,13	2,19
3150	1,92	1,93	1,97	1,97	2,06	1,97
4000	1,52	1,75	1,70	1,72	1,67	1,62
5000	1,18	1,27	1,38	1,36	1,47	1,39
Tr.(segundos)	2,82	3,30	3,78	3,16	3,22	3,32

Distribución de niveles

Tabla 4. Distribución de niveles medidos en los 10 puntos de recepción con la posición de fuente en F1.

DISTRIBUCIÓN DE NIVELES F1										
SONOMETRO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Frecuencias (Hz)\ld ²	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	52,7	66,4	62,1	61,9	59,8	61,2	62,9	64,0	57,5	59,9
63	55,0	67,4	61,3	59,8	61,9	62,4	63,7	58,2	58,6	59,0
80	45,0	72,9	60,0	63,4	66,8	61,9	58,9	62,5	65,3	62,3
100	40,9	74,3	66,4	68,1	67,7	69,9	67,0	67,0	65,1	64,8
125	40,4	79,0	68,2	71,3	72,1	71,6	65,5	66,7	71,0	68,0
160	39,6	81,2	74,3	74,6	72,0	73,6	74,0	71,0	69,4	70,3
200	40,1	83,8	73,6	74,9	72,3	75,3	70,0	69,3	68,9	69,3
250	38,9	81,6	75,0	73,4	75,2	73,2	71,0	71,0	69,5	69,9
315	41,9	83,7	75,9	74,6	73,9	74,9	73,7	72,0	71,8	70,6
400	46,8	83,2	73,4	73,9	73,2	72,3	73,4	70,9	70,8	69,8
500	49,9	84,5	77,3	77,1	75,6	76,4	74,2	72,6	72,9	71,3
630	53,9	85,4	76,6	78,1	76,8	75,5	74,0	73,5	72,9	72,5
800	98,6	85,8	77,7	79,0	77,6	76,7	75,7	74,5	73,7	73,2
1000	124,7	87,0	78,5	79,6	79,8	78,9	77,1	76,5	74,5	74,5
1250	100,9	87,9	80,1	82,0	79,7	80,1	80,9	79,5	76,0	75,0
1600	75,8	90,7	81,4	83,0	81,9	81,1	80,8	79,6	76,5	76,5
2000	75,2	88,7	80,0	82,2	80,4	80,5	78,7	78,5	75,2	75,1
2500	63,6	90,2	82,1	85,1	82,5	82,3	80,4	80,0	76,6	76,0
3150	80,0	88,3	80,0	82,5	81,2	81,6	80,4	78,9	74,9	74,0
4000	59,3	87,5	78,1	81,8	78,7	78,3	80,0	76,2	71,9	71,8
5000	62,2	89,8	78,7	81,7	79,1	79,0	78,5	78,0	72,8	72,0
Leq,F1 (dBA)	124,7	99,2	90,5	92,5	90,8	90,7	89,8	88,6	85,9	85,4

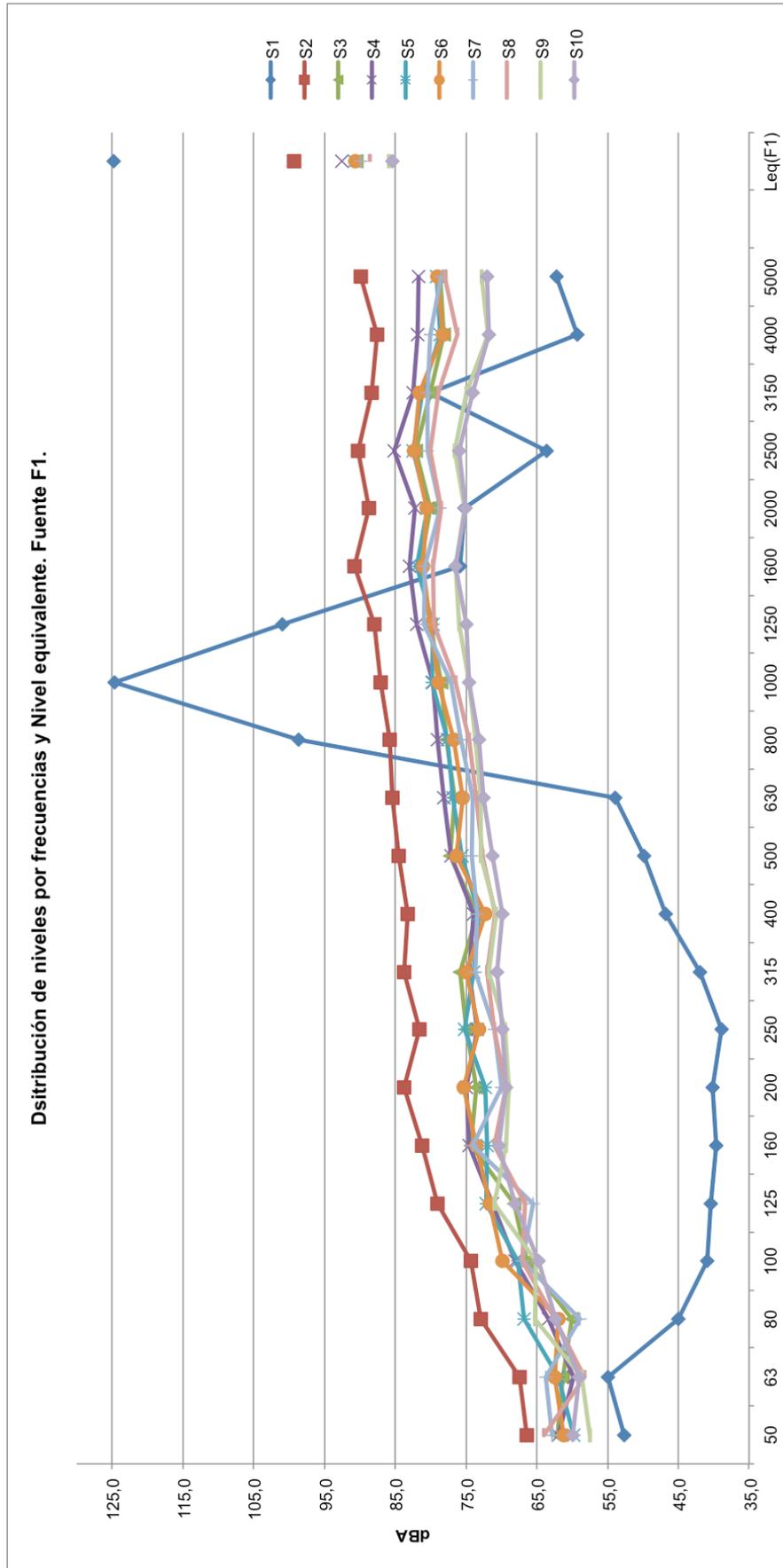


Gráfico 1. Distribución de niveles por frecuencias y Nivel equivalente ($L_{Aeq, 10s}$) en cada posición de medida con la fuente en la posición F1.

Tabla 5. Distribución de niveles medidos en los 10 puntos de recepción con la fuente en la posición F1.

DISTRIBUCIÓN DE NIVELES F2										
SONOMETRO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Frecuencias (Hz)\ld	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50	66,3	70,1	67,2	65,2	61,2	63,3	61,9	65,0	70,3	72,7
63	65,3	68,0	71,0	67,1	67,9	69,1	69,1	66,6	74,0	75,5
80	69,0	72,5	68,4	72,3	72,3	71,2	68,8	69,8	79,4	77,5
100	76,8	75,7	71,8	73,6	72,4	73,6	75,1	72,2	75,1	79,5
125	73,8	79,6	74,5	72,6	74,0	75,8	68,2	66,6	83,0	77,8
160	73,1	80,2	74,9	75,5	74,9	73,5	75,4	69,4	80,7	78,2
200	74,0	78,0	73,4	72,4	72,7	74,0	70,2	69,5	78,1	76,2
250	72,7	71,2	71,8	69,8	70,4	71,5	66,6	67,5	76,0	76,5
315	69,0	69,9	71,5	70,6	70,6	70,0	66,8	67,5	78,9	79,9
400	72,1	71,6	71,0	71,4	70,9	70,9	67,3	68,1	80,0	80,3
500	77,3	78,3	75,9	74,3	75,3	75,3	72,4	70,2	84,5	86,0
630	77,3	79,2	78,1	76,6	74,8	75,6	72,6	72,4	86,7	85,2
800	76,3	78,0	76,3	75,7	74,4	74,3	71,6	71,6	84,7	84,2
1000	78,9	81,7	77,6	77,3	77,2	76,6	74,3	73,5	87,1	86,4
1250	81,3	82,7	80,0	80,0	79,2	79,2	77,6	76,1	89,1	88,4
1600	80,9	87,4	80,7	80,7	79,8	79,3	76,8	77,0	88,9	88,9
2000	80,1	84,8	80,4	79,1	78,6	77,9	75,8	75,7	87,6	89,0
2500	81,5	85,6	81,8	80,5	80,4	79,3	77,3	77,6	90,1	90,4
3150	80,3	84,7	80,2	79,2	78,7	77,6	75,4	75,6	88,6	89,7
4000	78,7	83,1	79,6	77,5	76,1	75,9	73,0	73,5	87,0	87,9
5000	78,8	86,1	81,5	77,8	76,1	75,9	72,9	73,2	89,7	89,2
Leq,F2 (dBA)	90,7	94,8	90,7	89,7	89,1	88,8	86,7	86,1	98,8	98,9

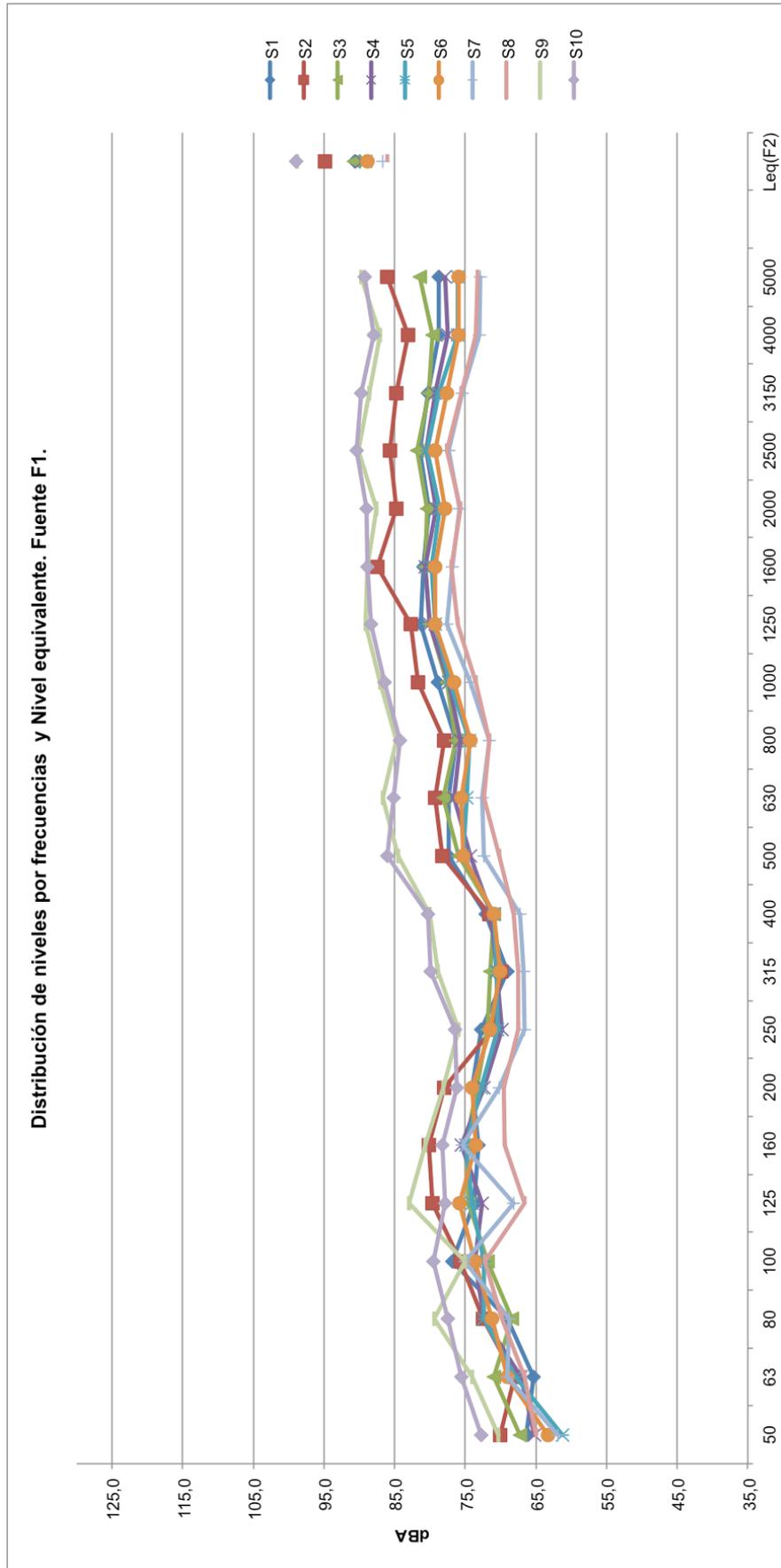


Gráfico 2. Distribución de niveles por frecuencias y Nivel equivalente ($L_{Aeq, 10s}$) en cada posición de medida con la fuente en la posición F2.

ANEXO V: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ACÚSTICA EN CATT

F1xS1

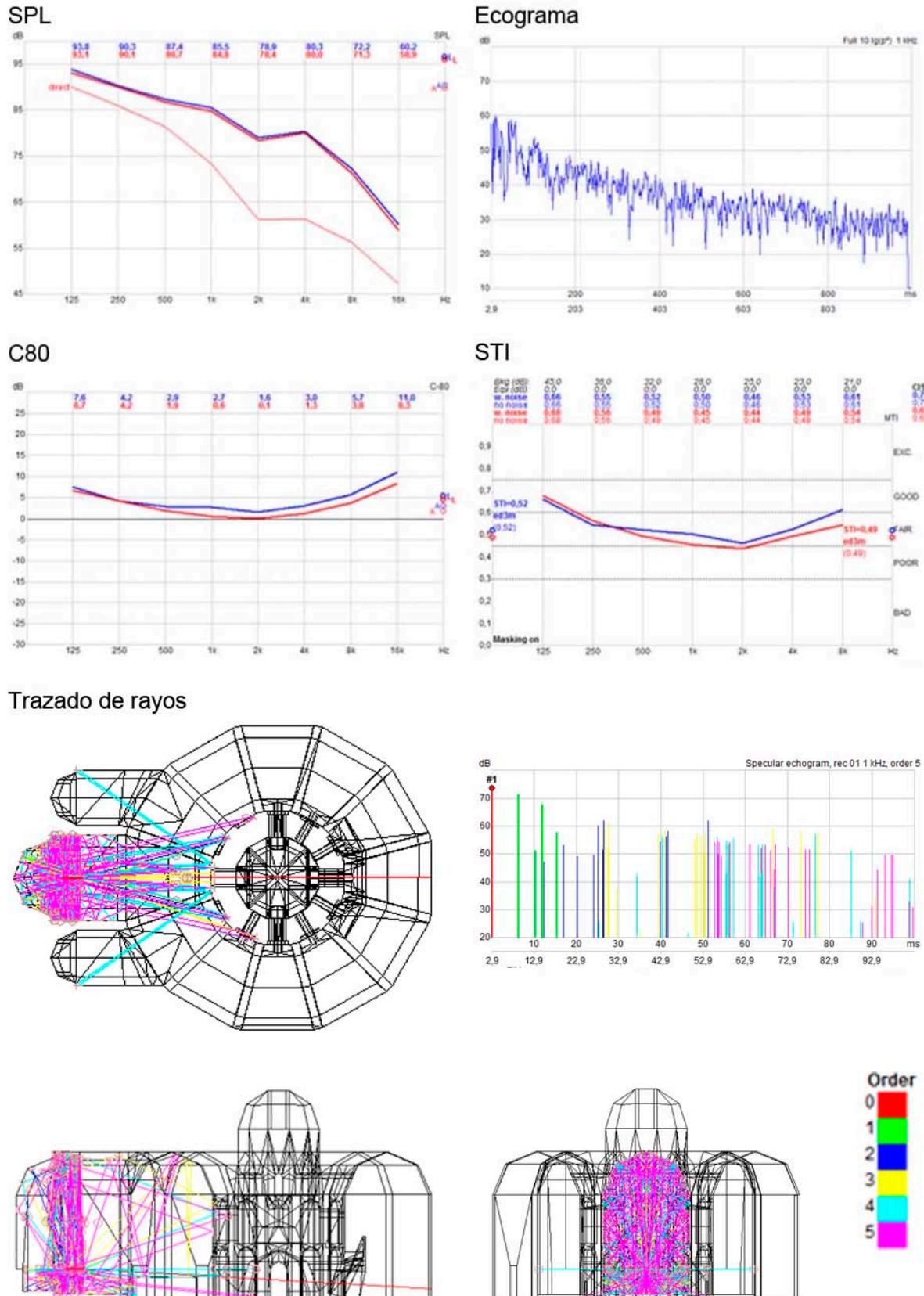


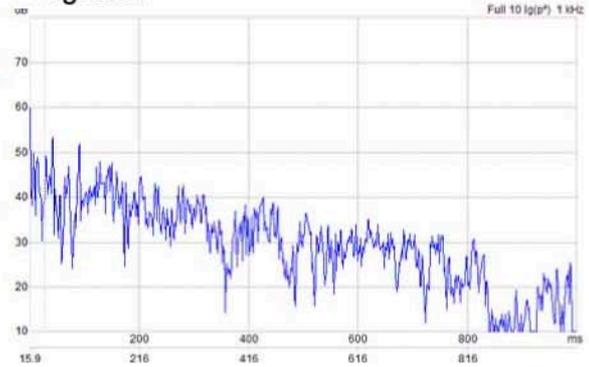
Figura 1. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S1 con la fuente F1.

F1xS2

SPL



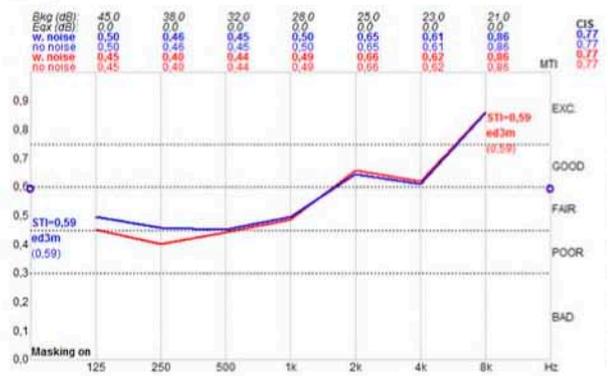
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

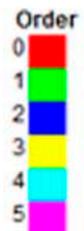
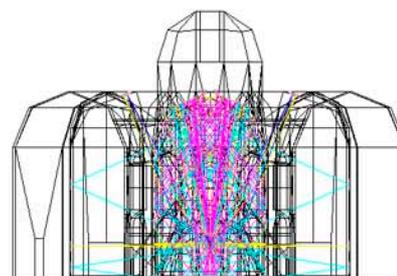
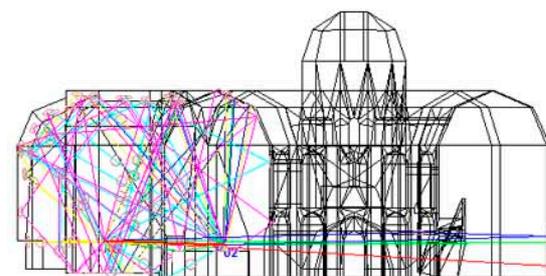
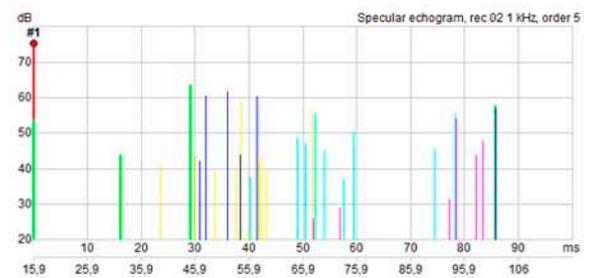
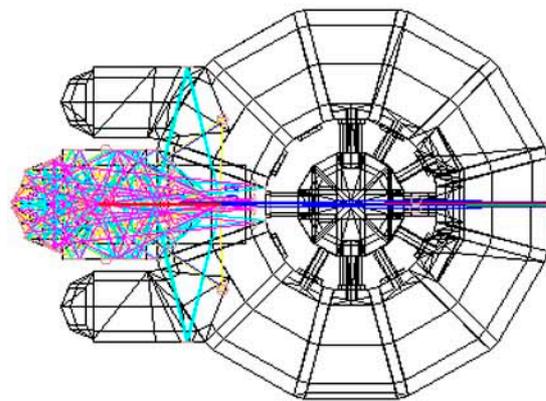


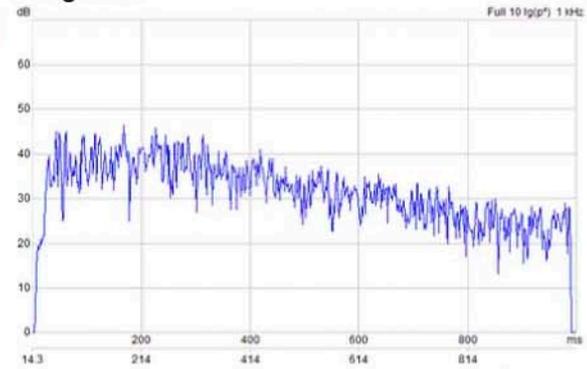
Figura 2. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S2 con la fuente F1.

F1xS3

SPL



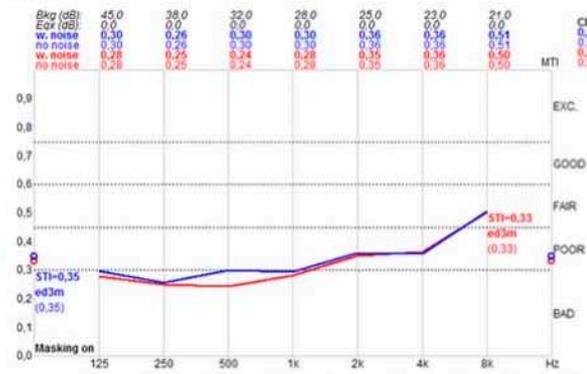
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

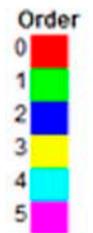
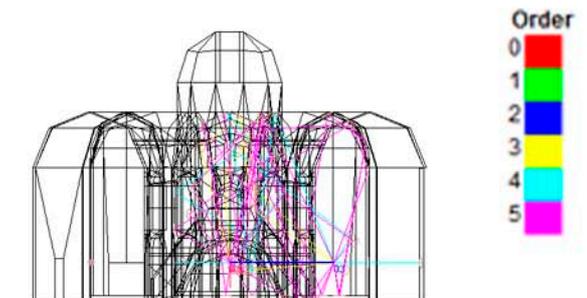
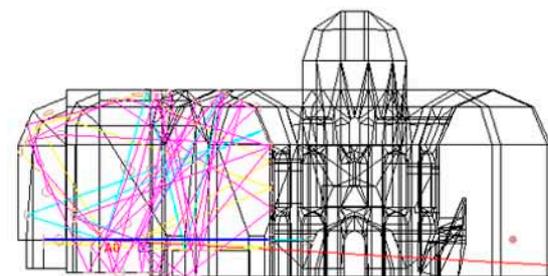
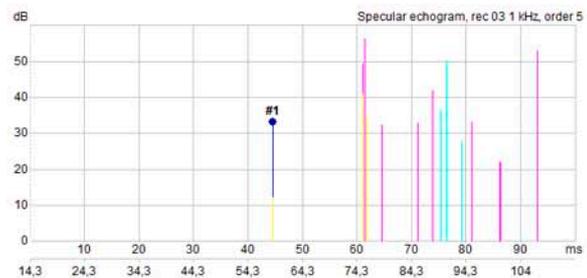
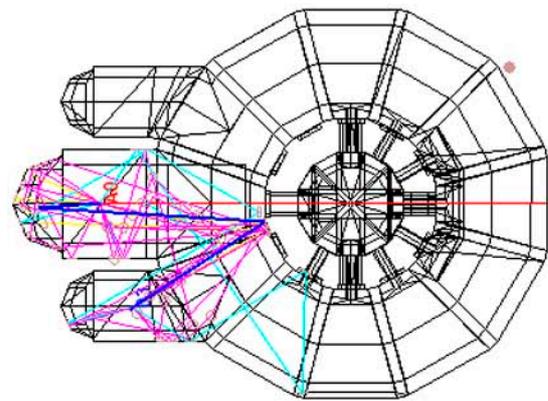


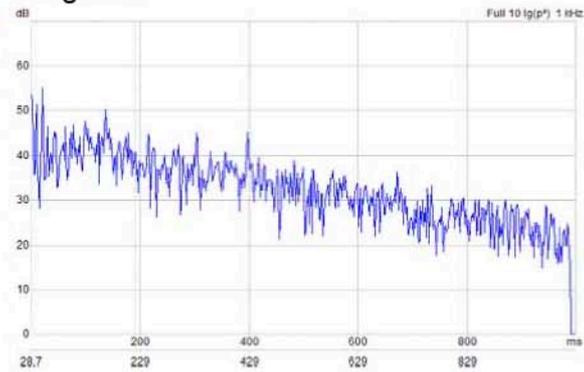
Figura 3. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectograma obtenidos en el receptor S3 con la fuente F1.

F1xS4

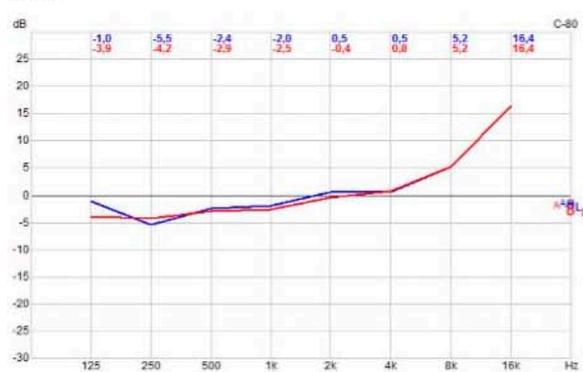
SPL



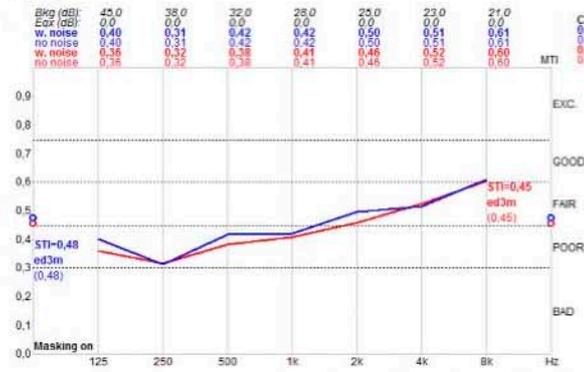
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

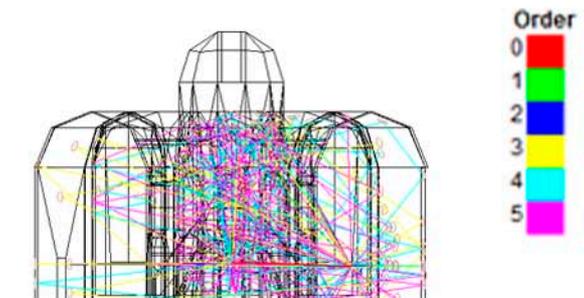
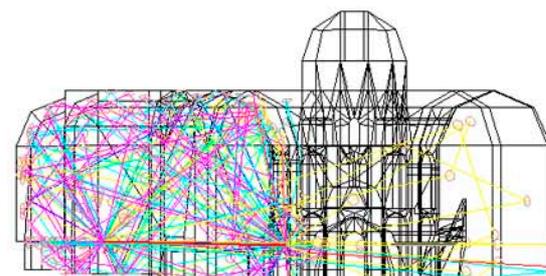
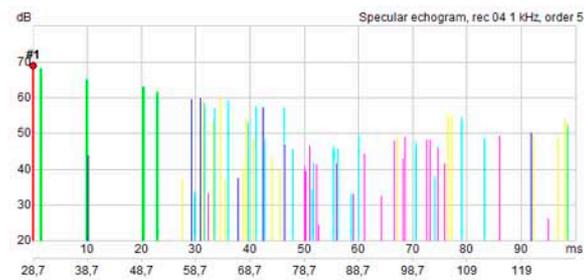
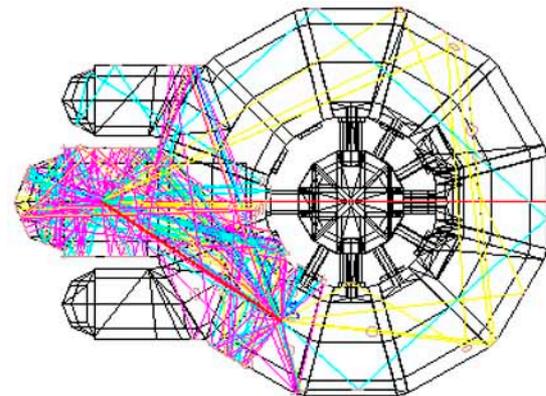
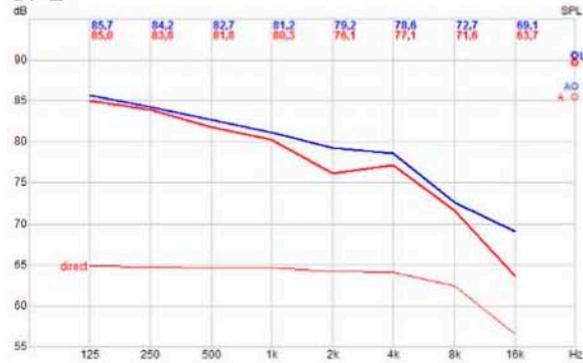


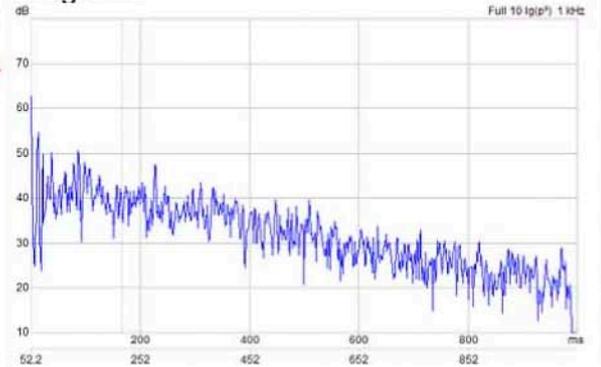
Figura 4. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectograma obtenidos en el receptor S4 con la fuente F1.

F1xS6

SPL



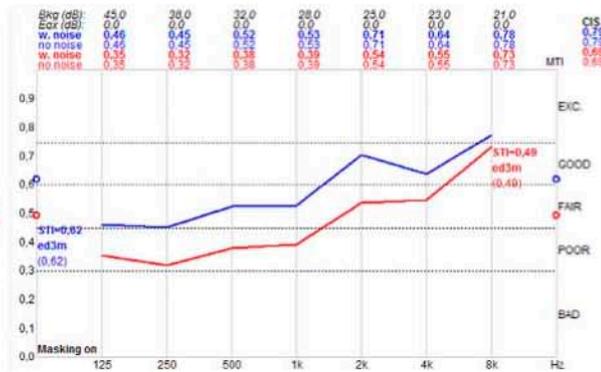
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

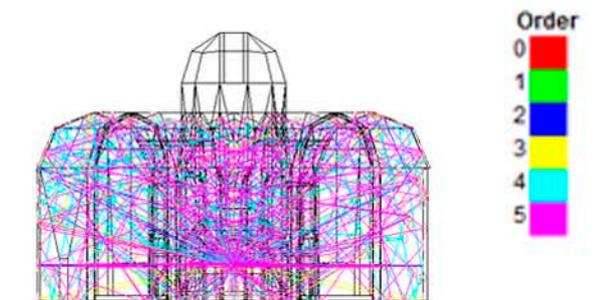
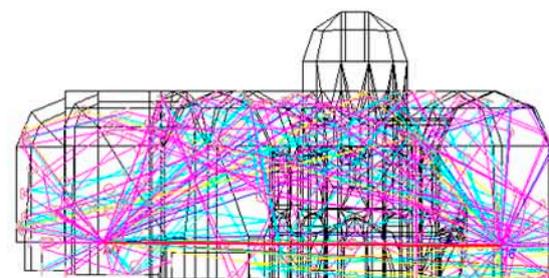
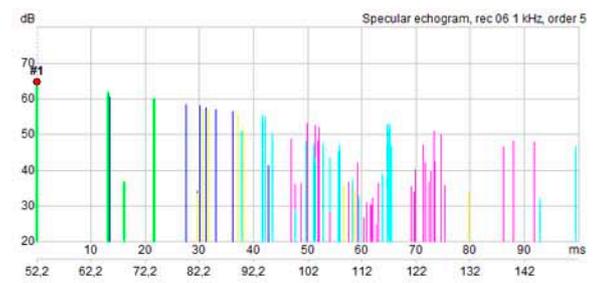
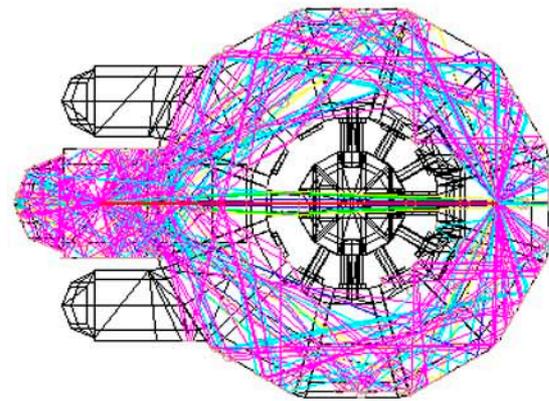
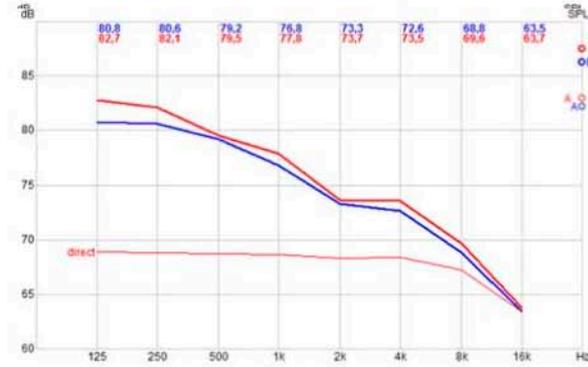


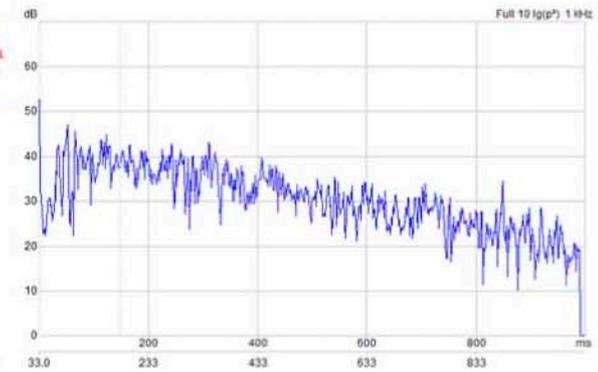
Figura 5. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectograma obtenidos en el receptor S6 con la fuente F1.

F1xS7

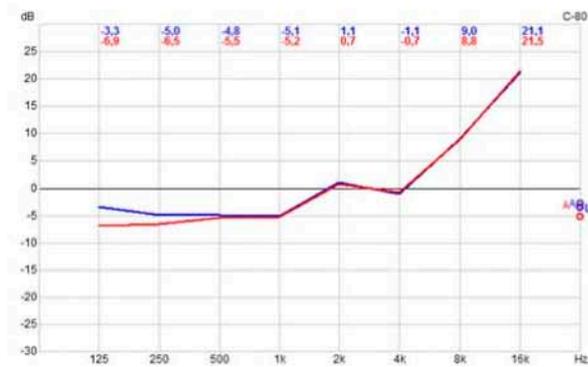
SPL



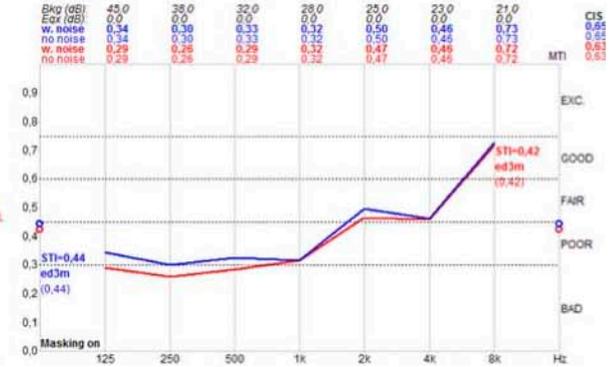
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

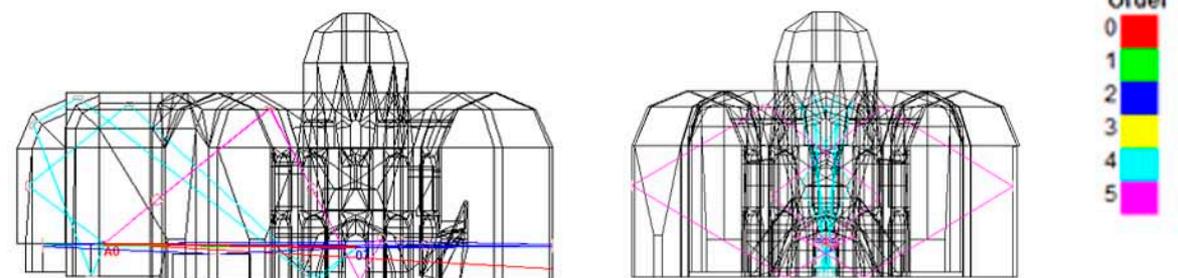
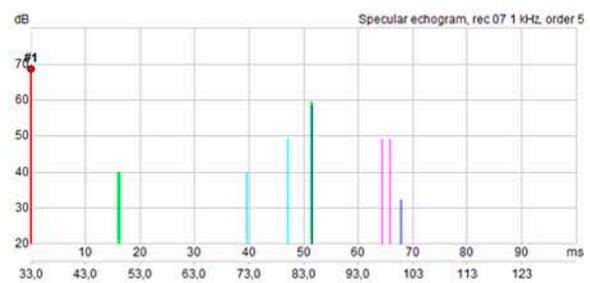
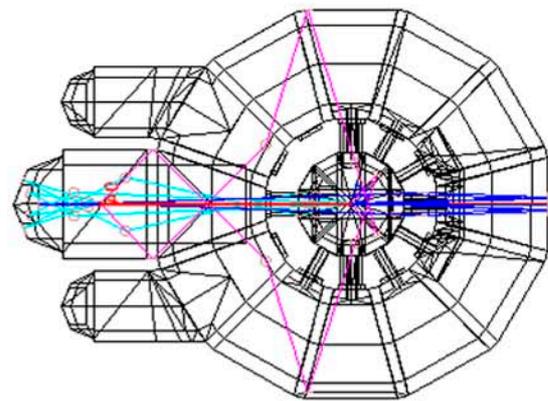


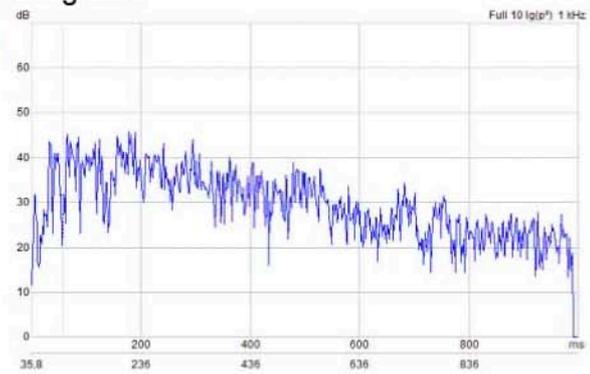
Figura 6. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S7 con la fuente F1.

F1xS8

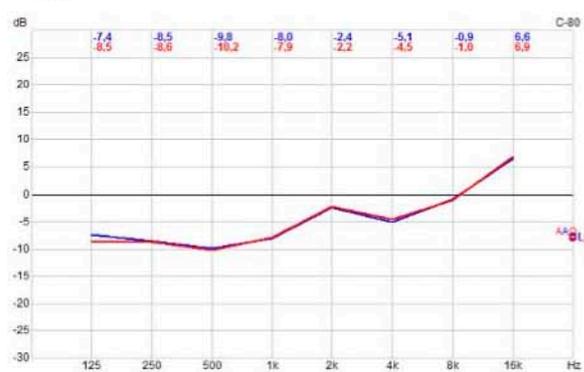
SPL



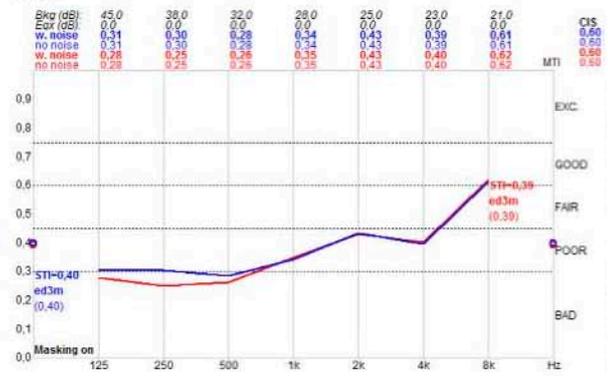
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

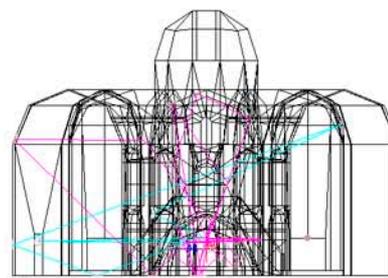
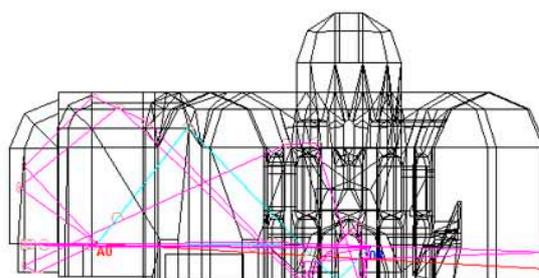
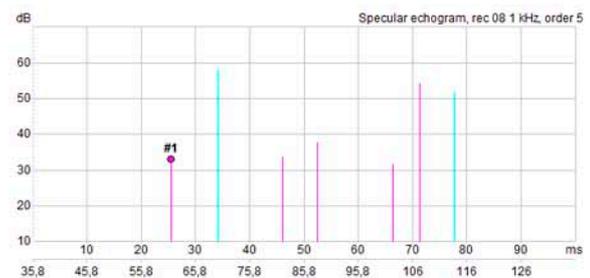
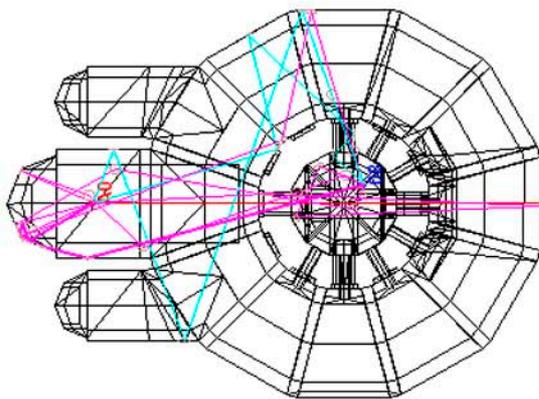
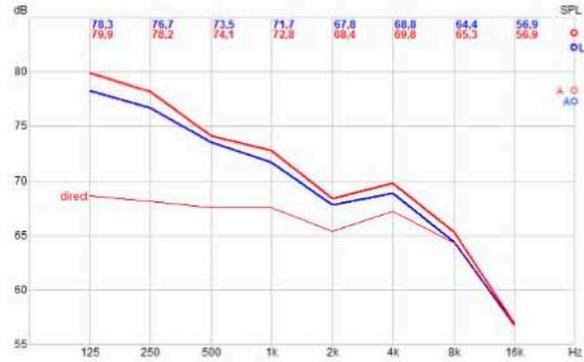


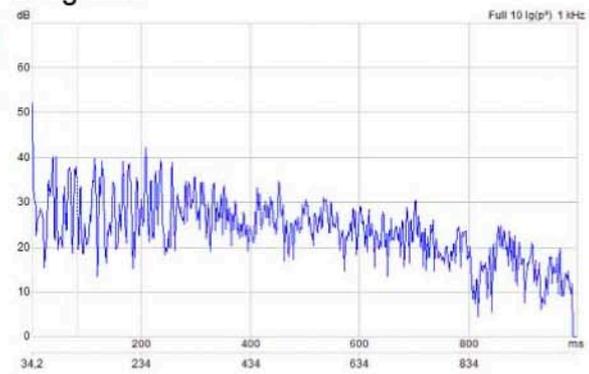
Figura 7. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S8 con la fuente F1.

F1xS9

SPL



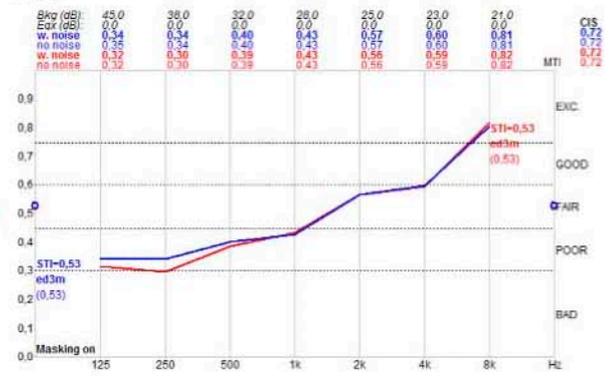
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

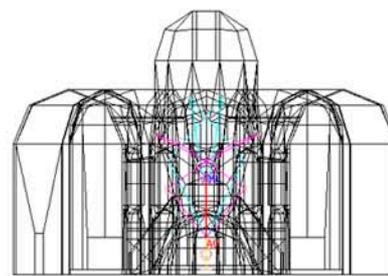
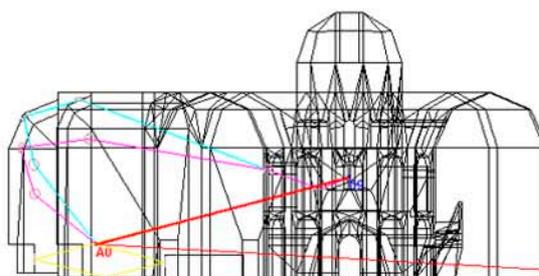
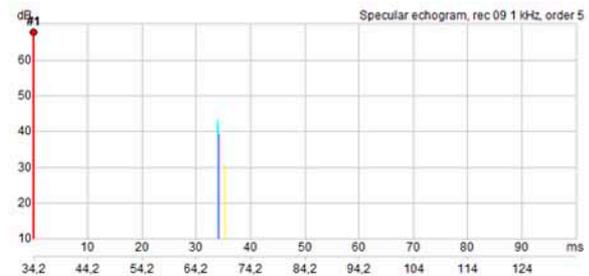
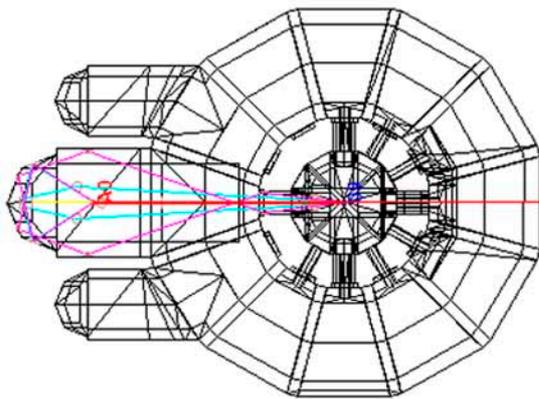


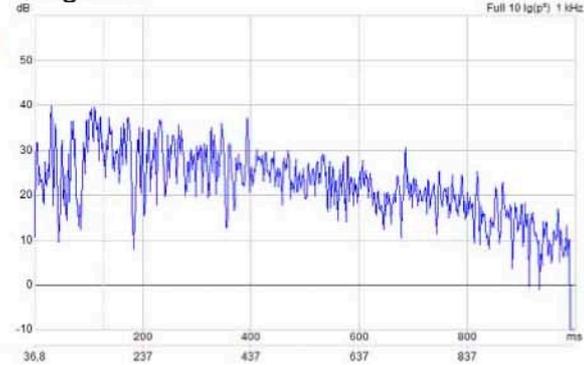
Figura 8. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectograma obtenidos en el receptor S9 con la fuente F1.

F1xS10

SPL



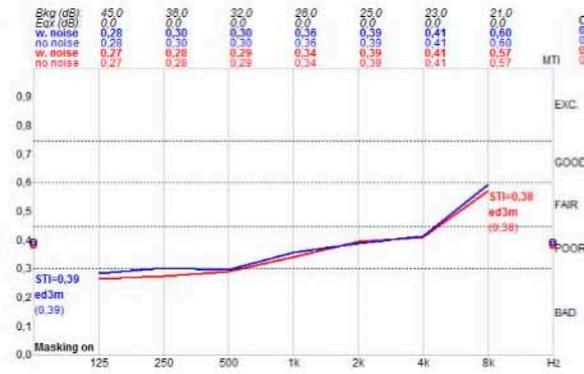
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

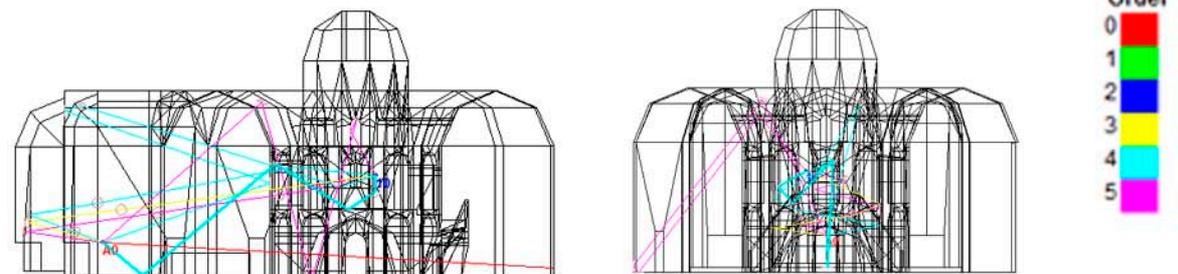
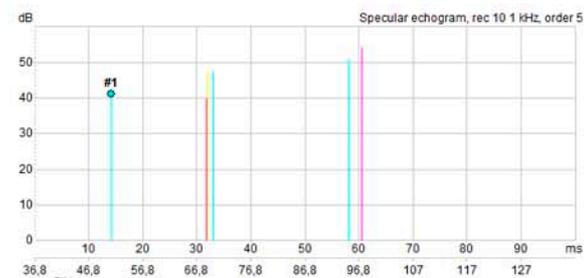
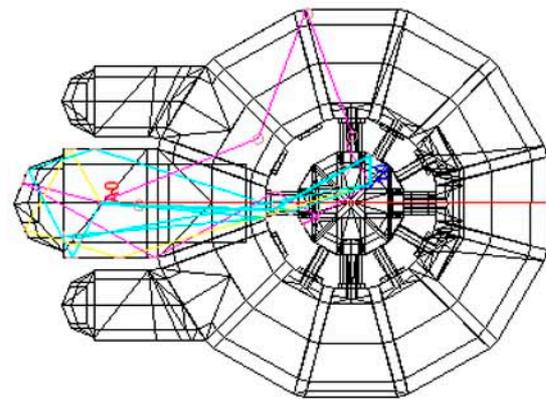
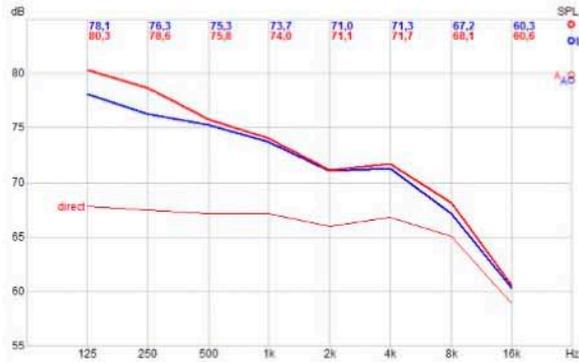


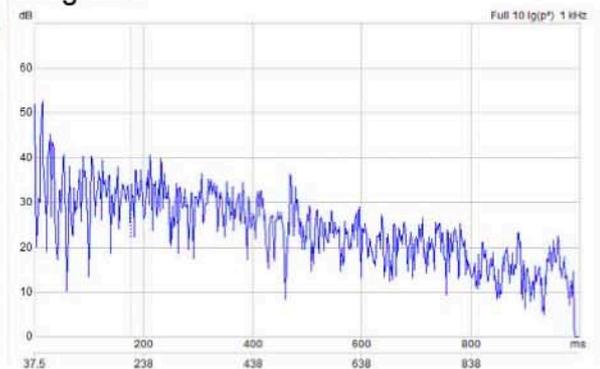
Figura 9. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S10 con la fuente F1.

F2xS1

SPL



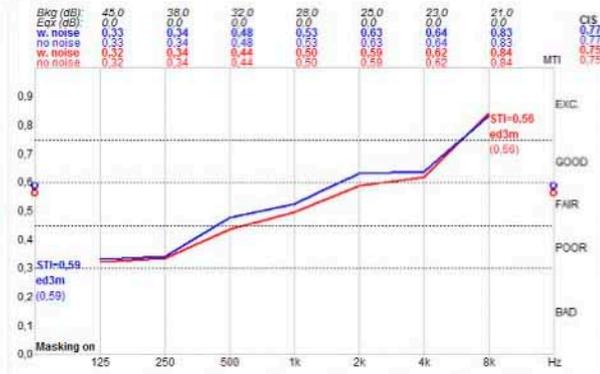
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

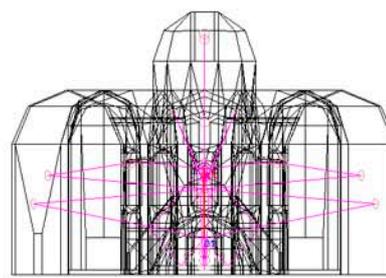
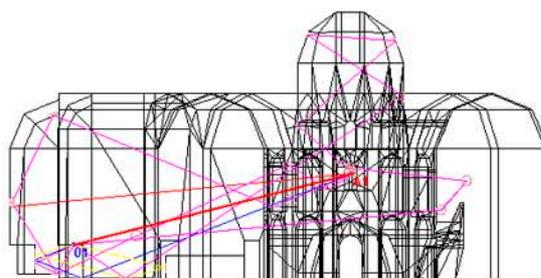
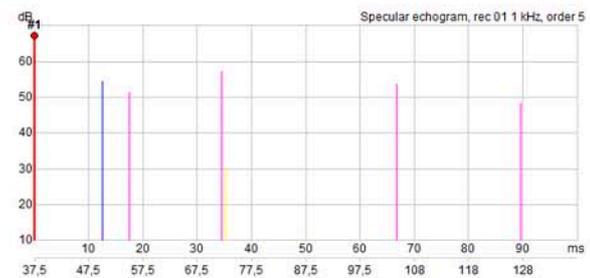
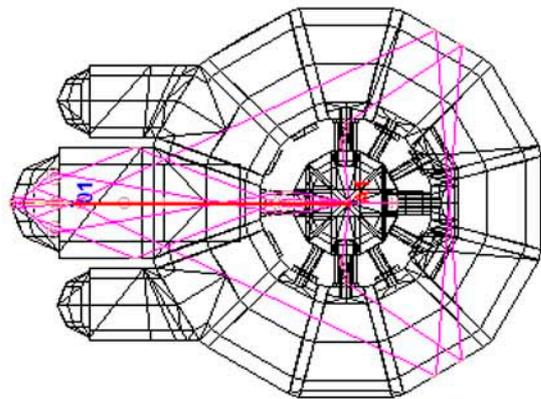
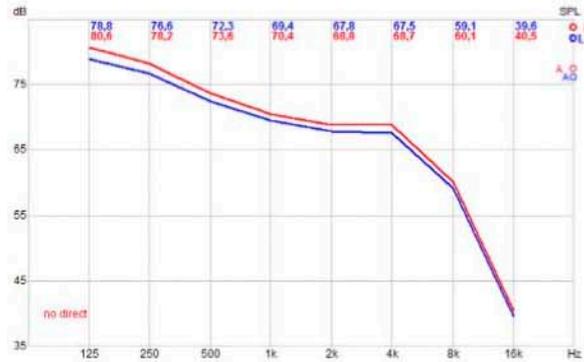


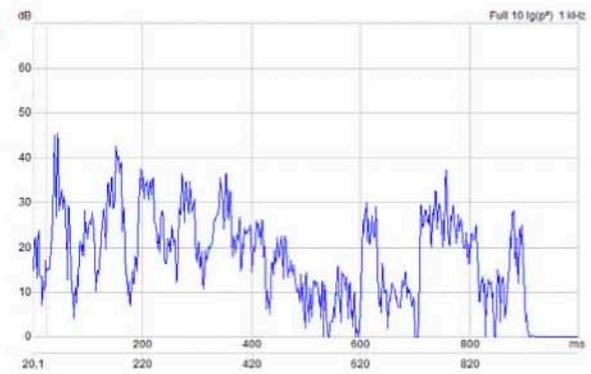
Figura 10. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S1 con la fuente F2.

F2xS2

SPL



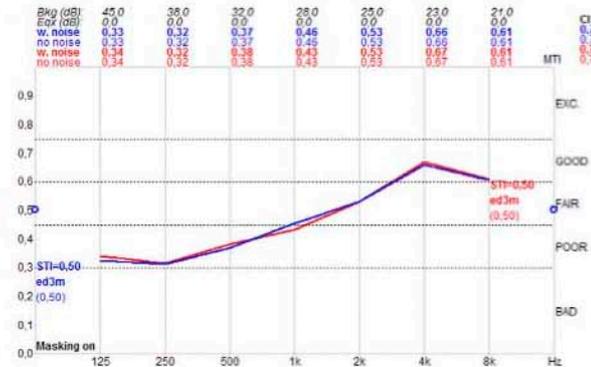
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

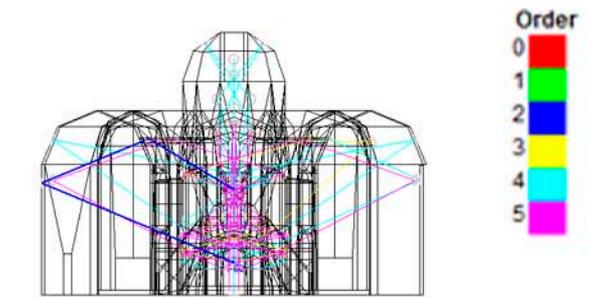
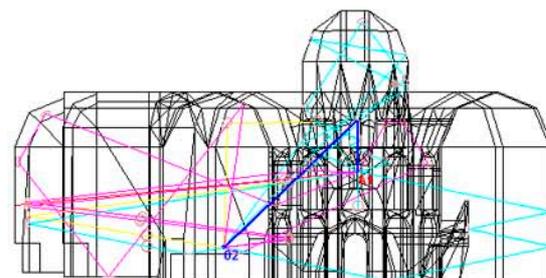
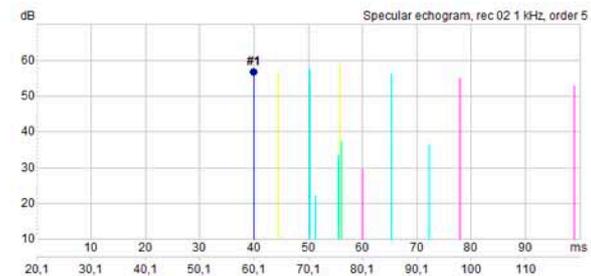
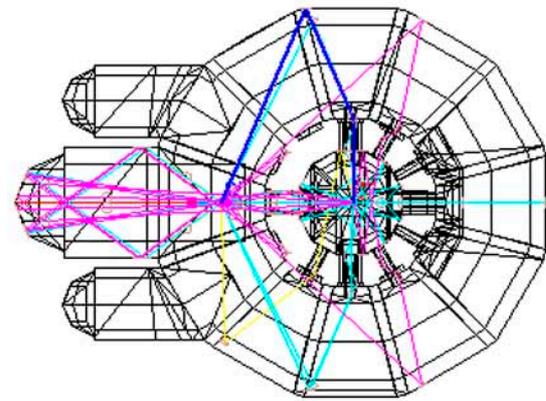


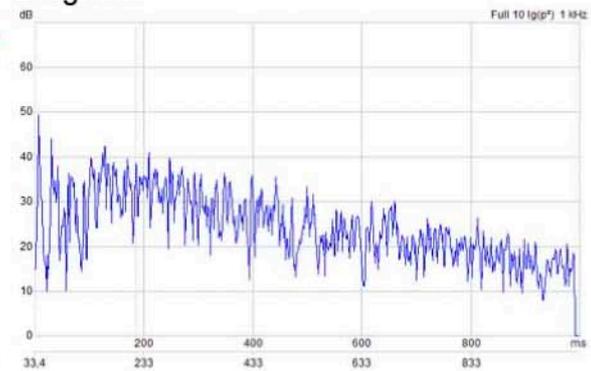
Figura 11. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S2 con la fuente F2.

F2xS3

SPL



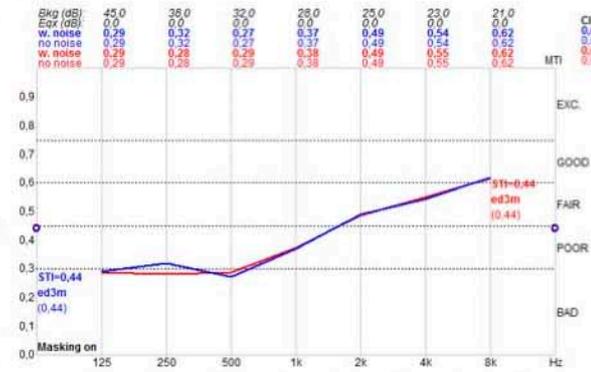
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

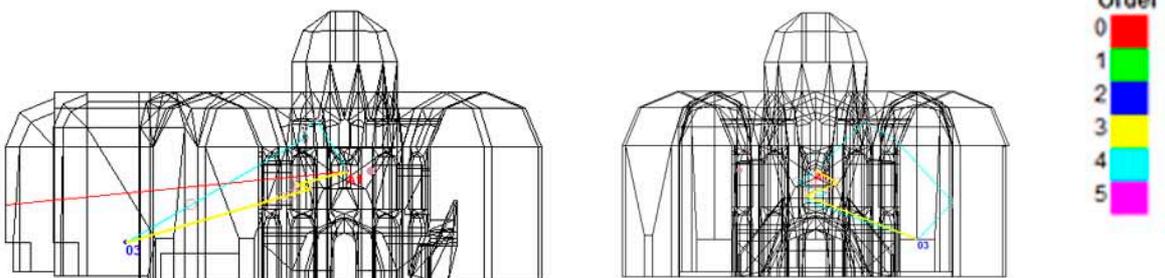
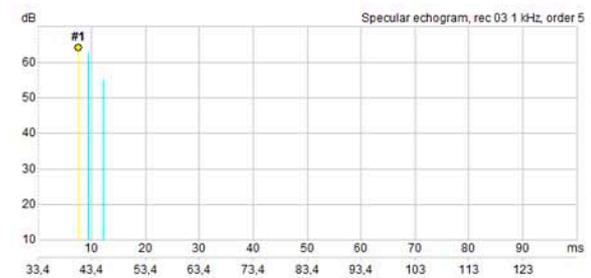
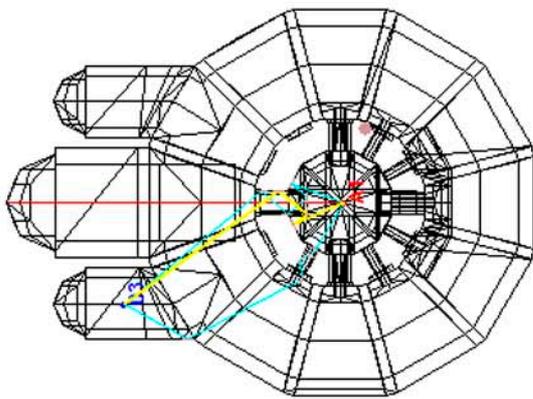
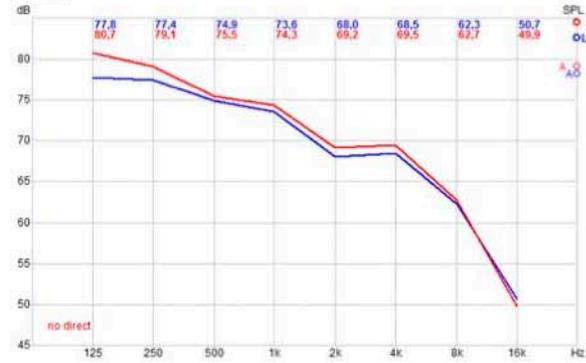


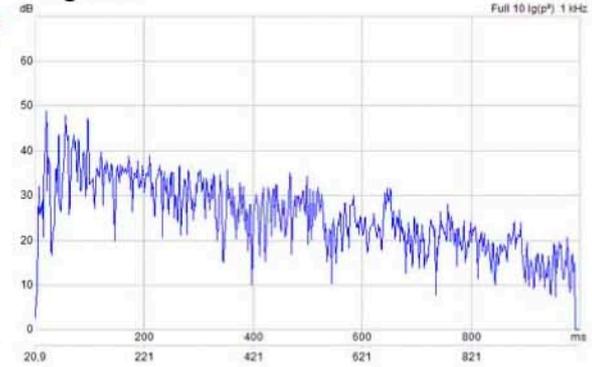
Figura 12. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectograma obtenidos en el receptor S3 con la fuente F2.

F2xS4

SPL



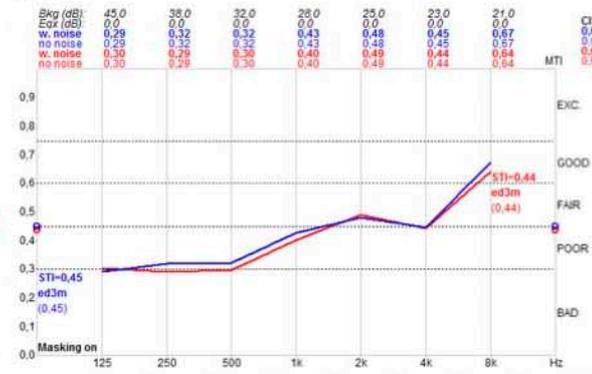
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

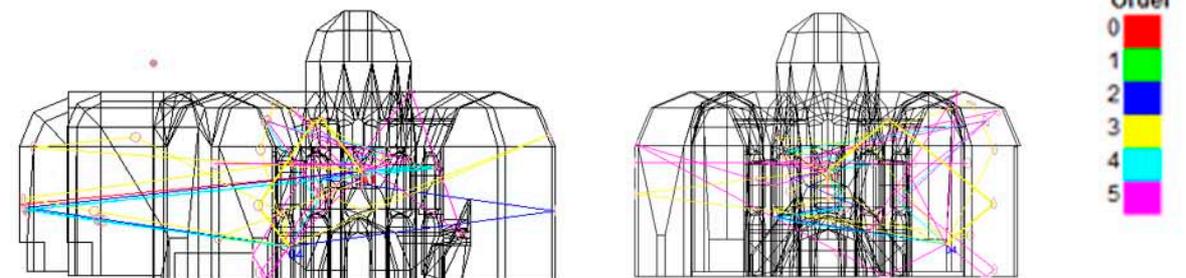
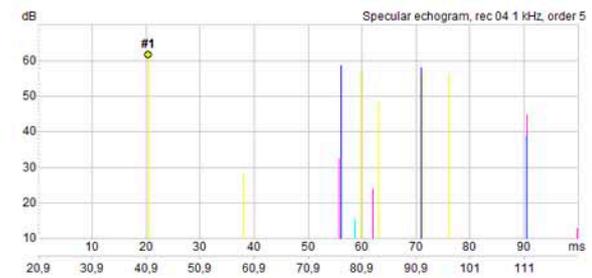
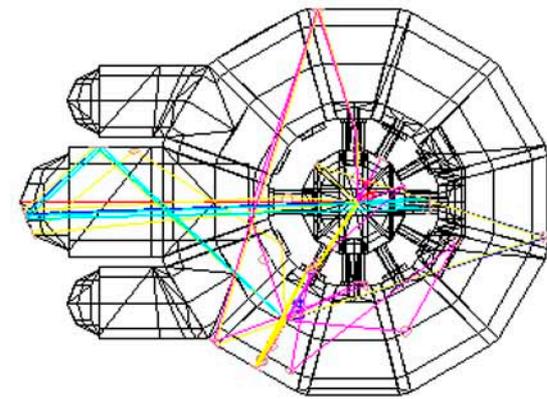
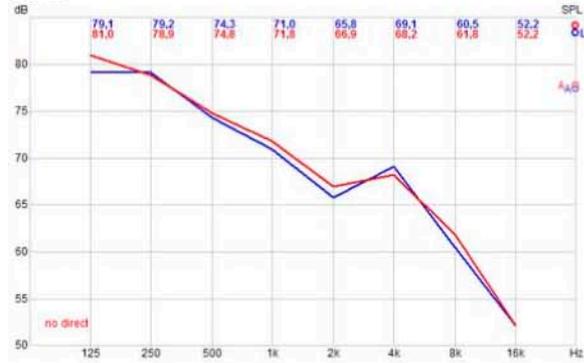


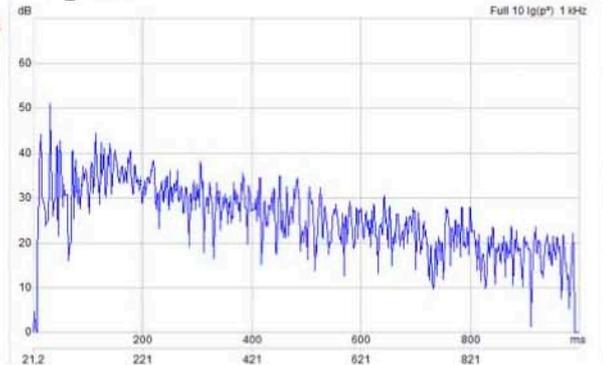
Figura 13. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S4 con la fuente F2.

F2xS6

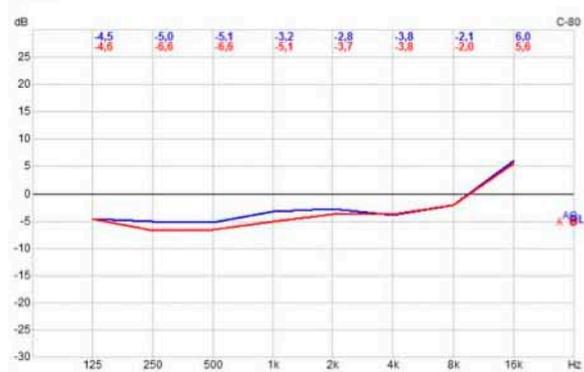
SPL



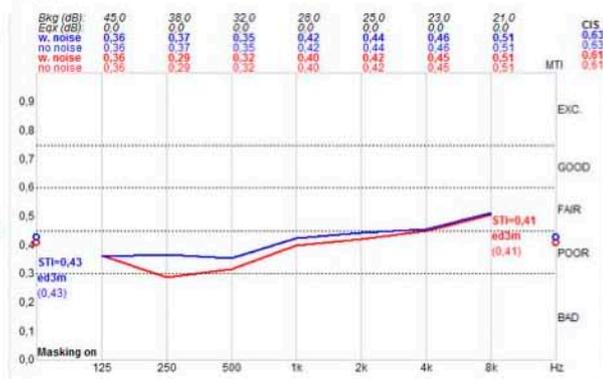
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

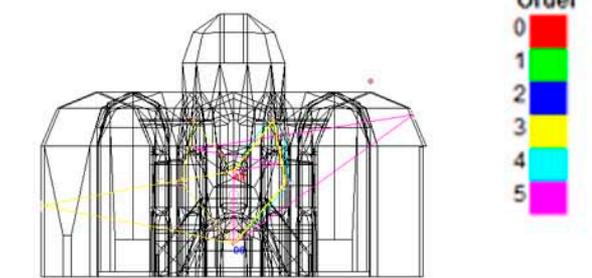
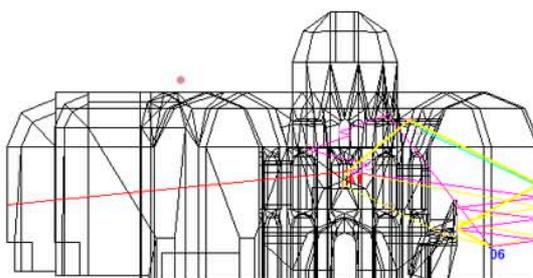
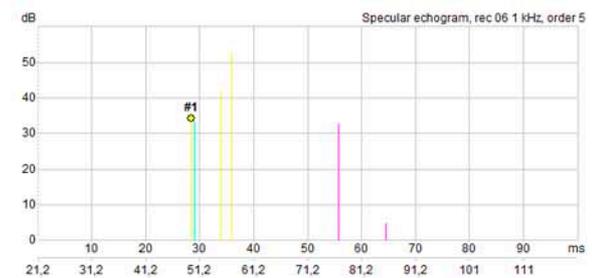
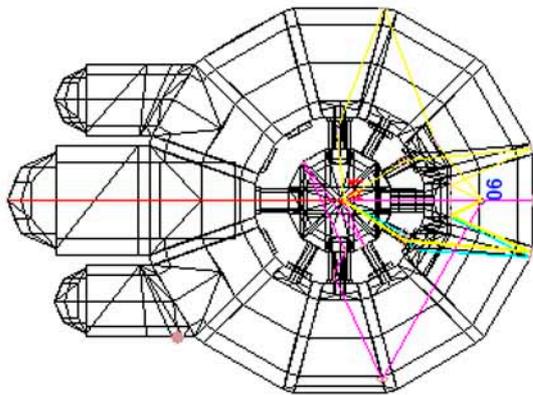
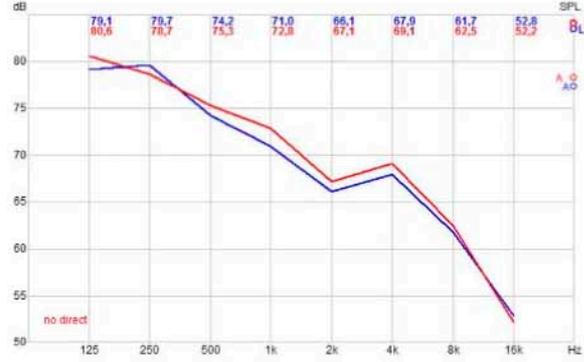


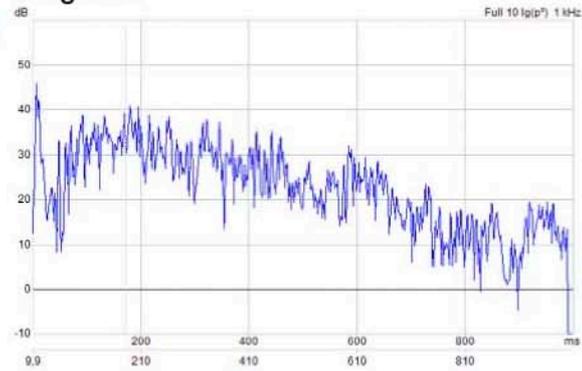
Figura 14. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S6 con la fuente F2.

F2xS7

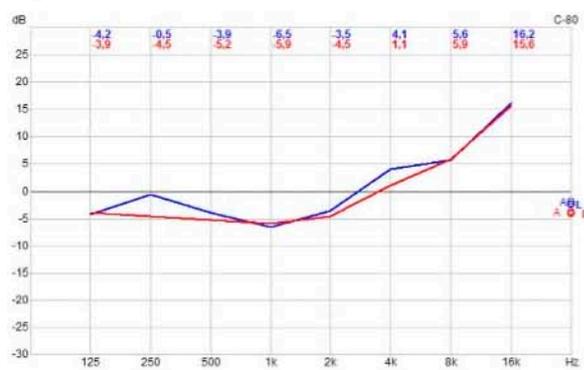
SPL



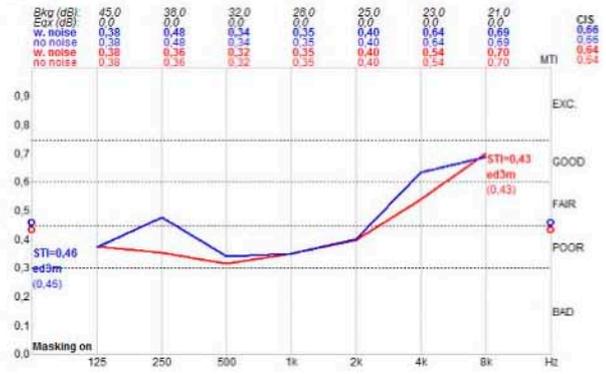
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

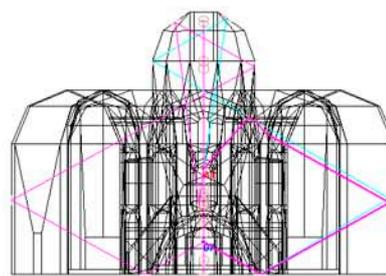
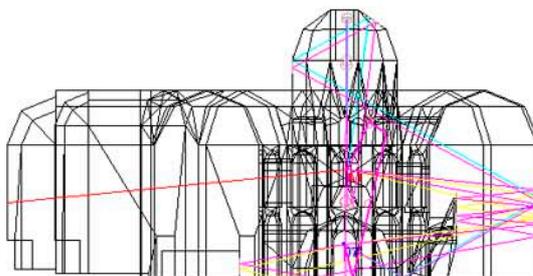
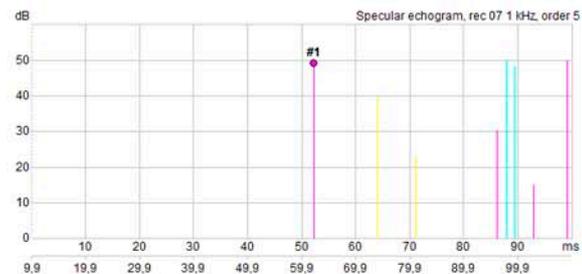
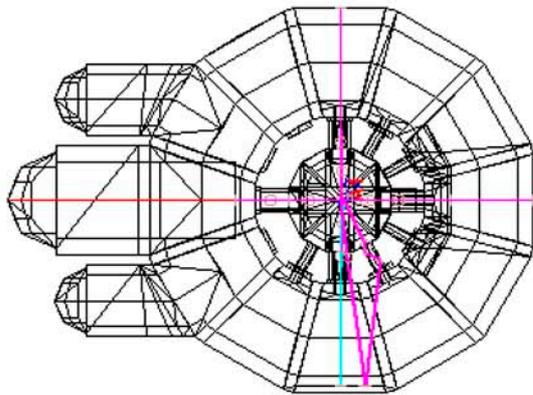


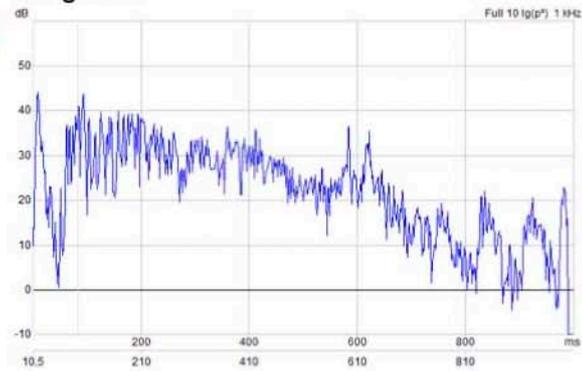
Figura 15. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S7 con la fuente F2.

F2xS8

SPL



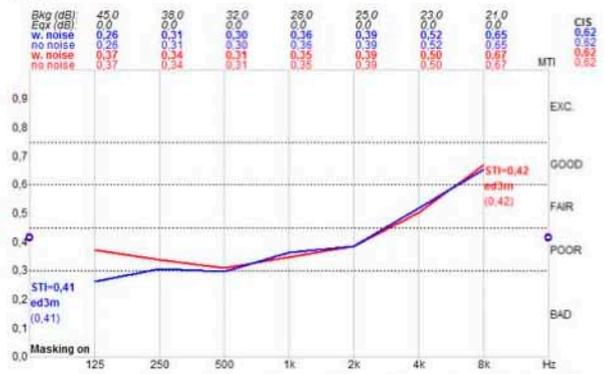
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

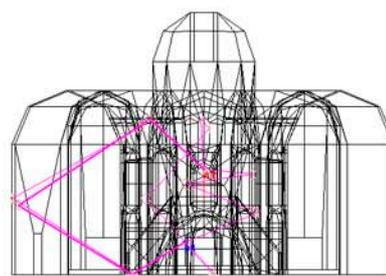
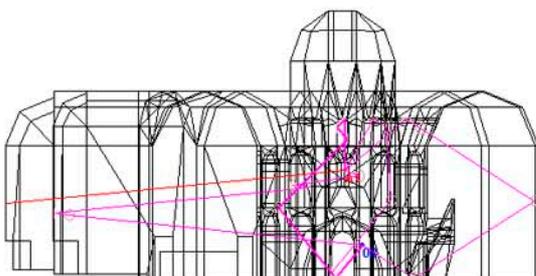
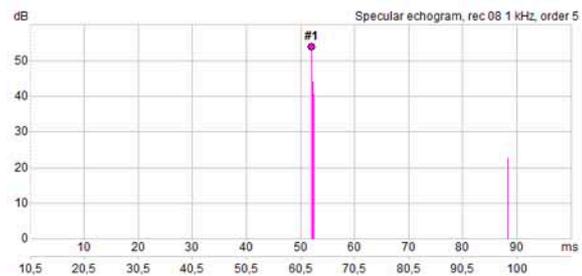
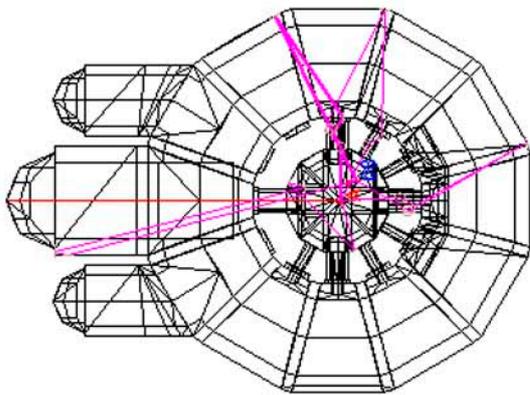


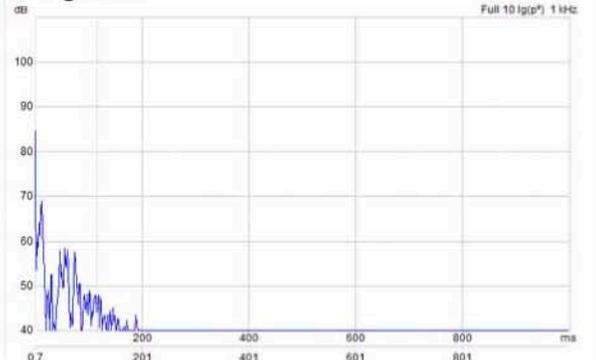
Figura 16. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S8 con la fuente F2.

F2xS9

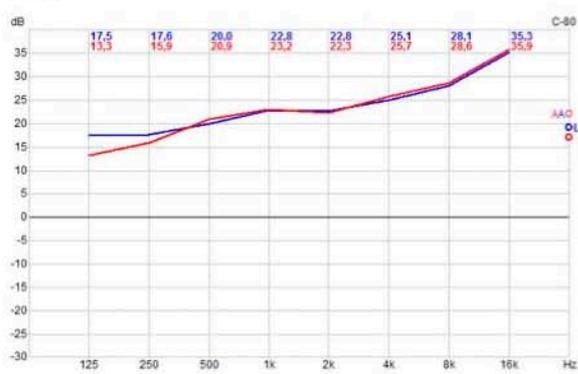
SPL



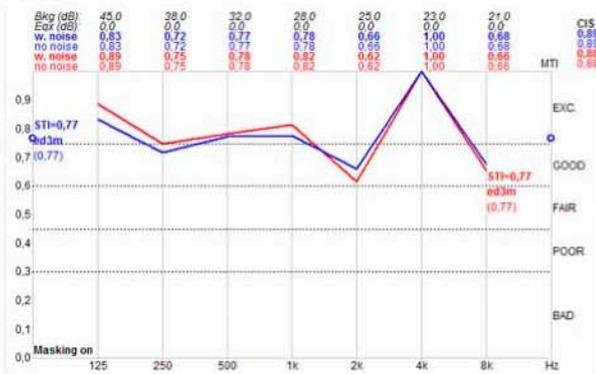
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

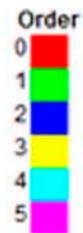
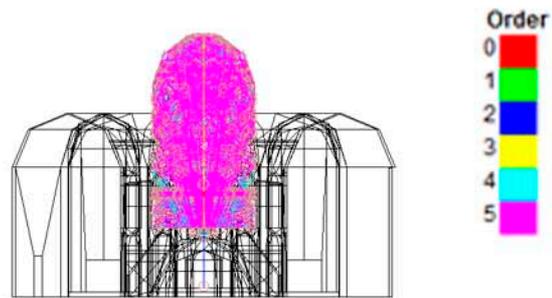
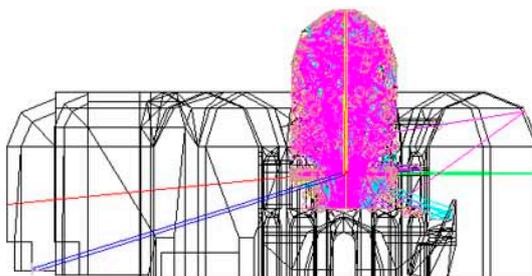
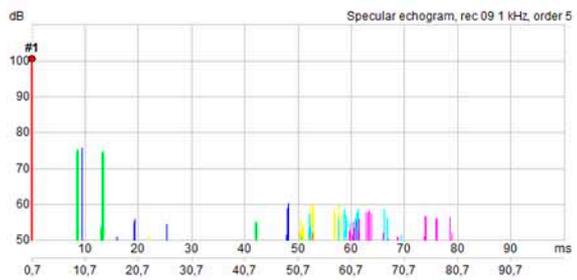
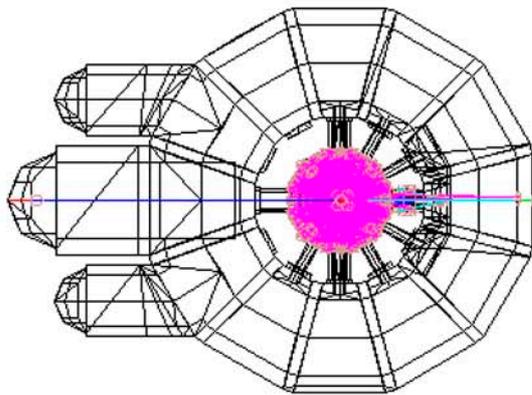
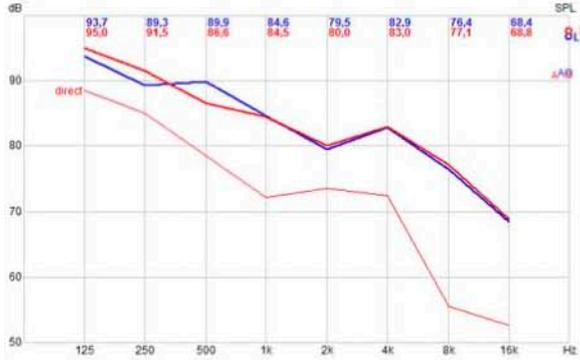


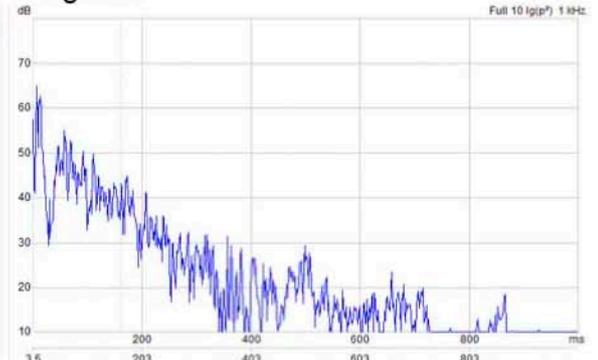
Figura 17. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S9 con la fuente F2.

F2xS10

SPL



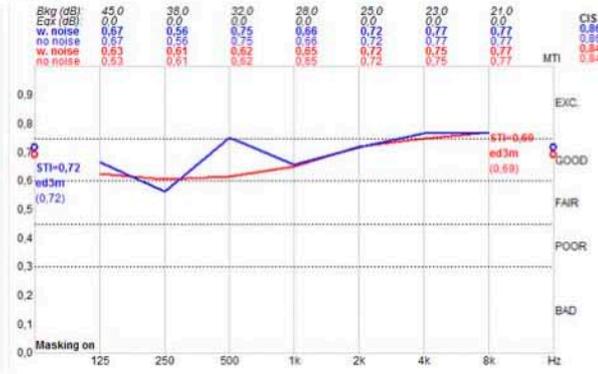
Ecograma



C80



STI



Trazado de rayos

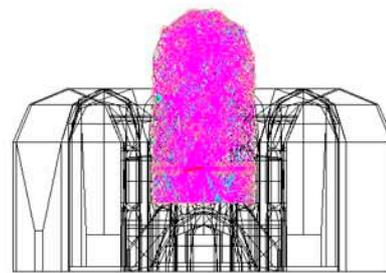
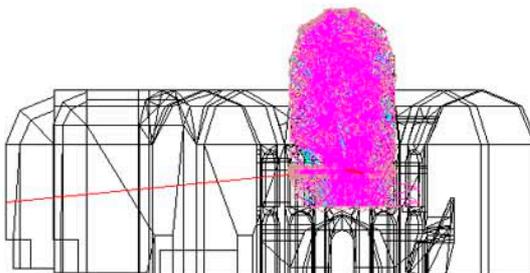
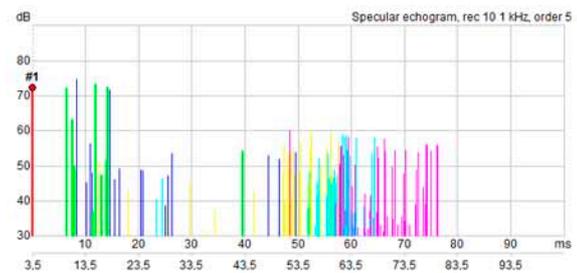
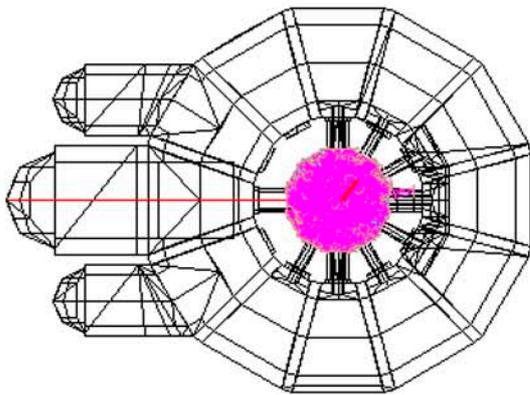


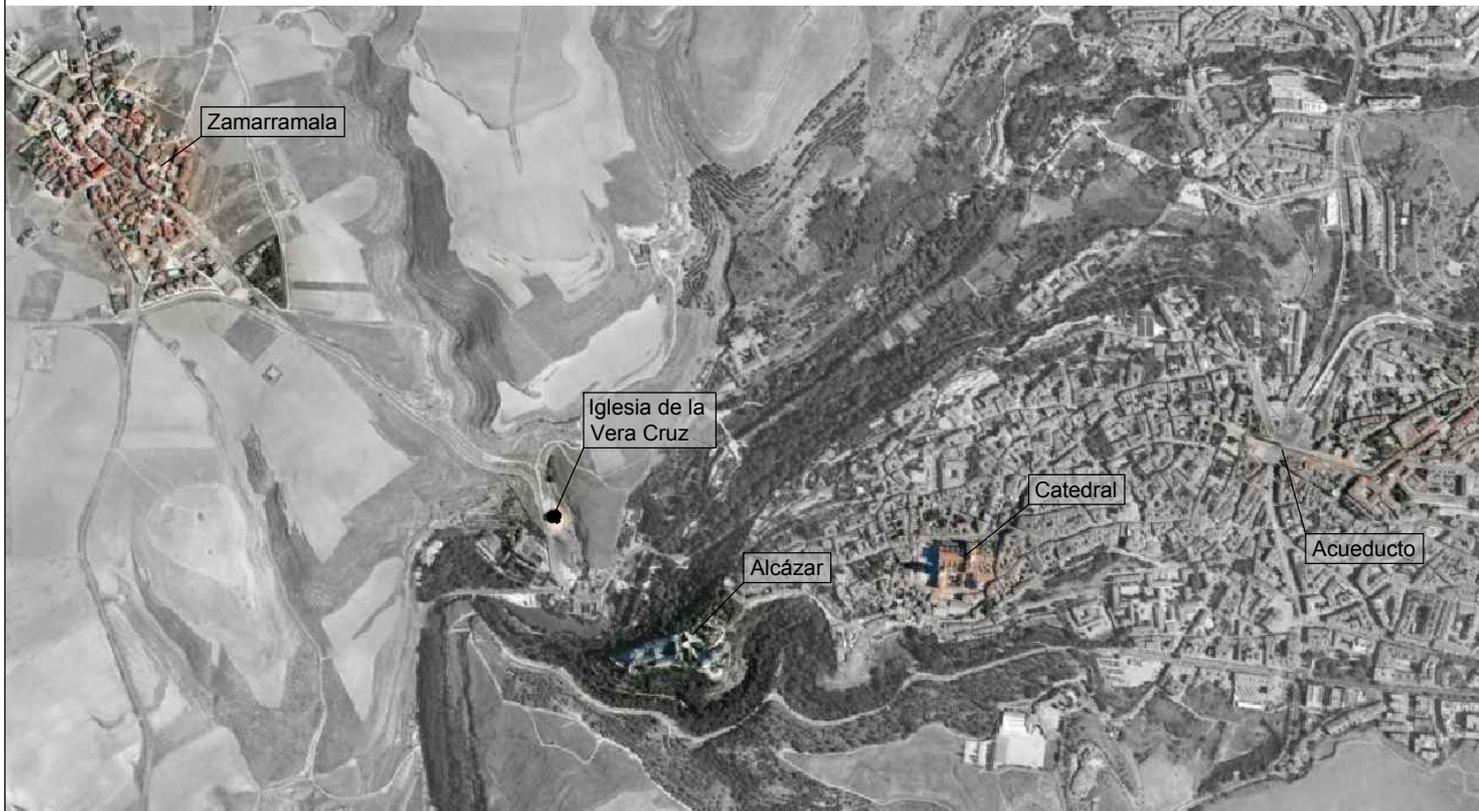
Figura 18. Gráficos SPL, C80, STI, Ecograma, trazado de rayos y Espectrograma obtenidos en el receptor S10 con la fuente F2.

ANEXO VI: PLANIMETRÍA



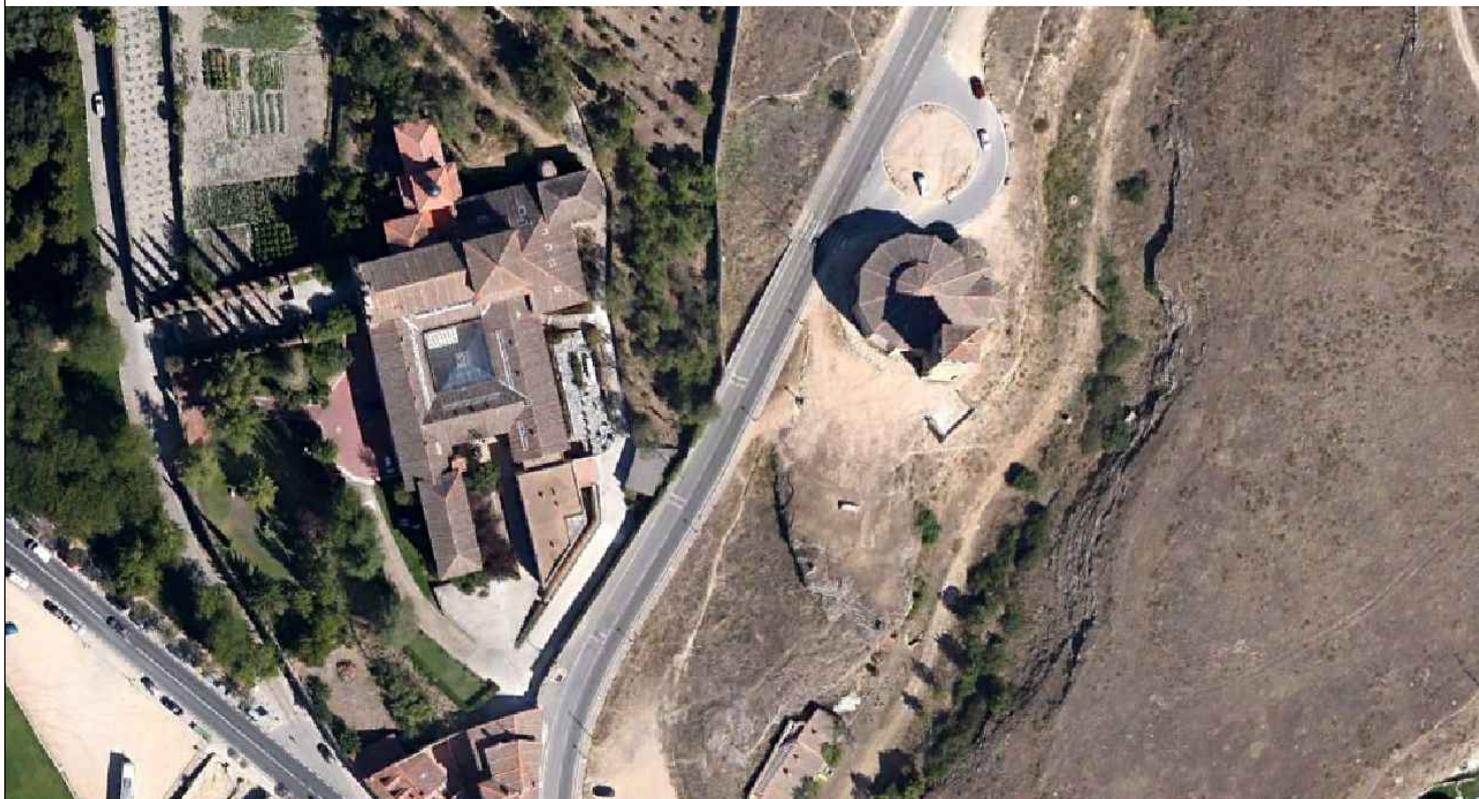
1/15.000.

0 100 200 300 500 1000 m



1/1.500.

0 10 20 30 50 100 m



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia

PLANO: Plano de situación.

ESCALA: Varias.

FECHA: 31/08/2015

Juan Moreno de Santos

Firmado:

**Plano nº
1**

 Construcción original

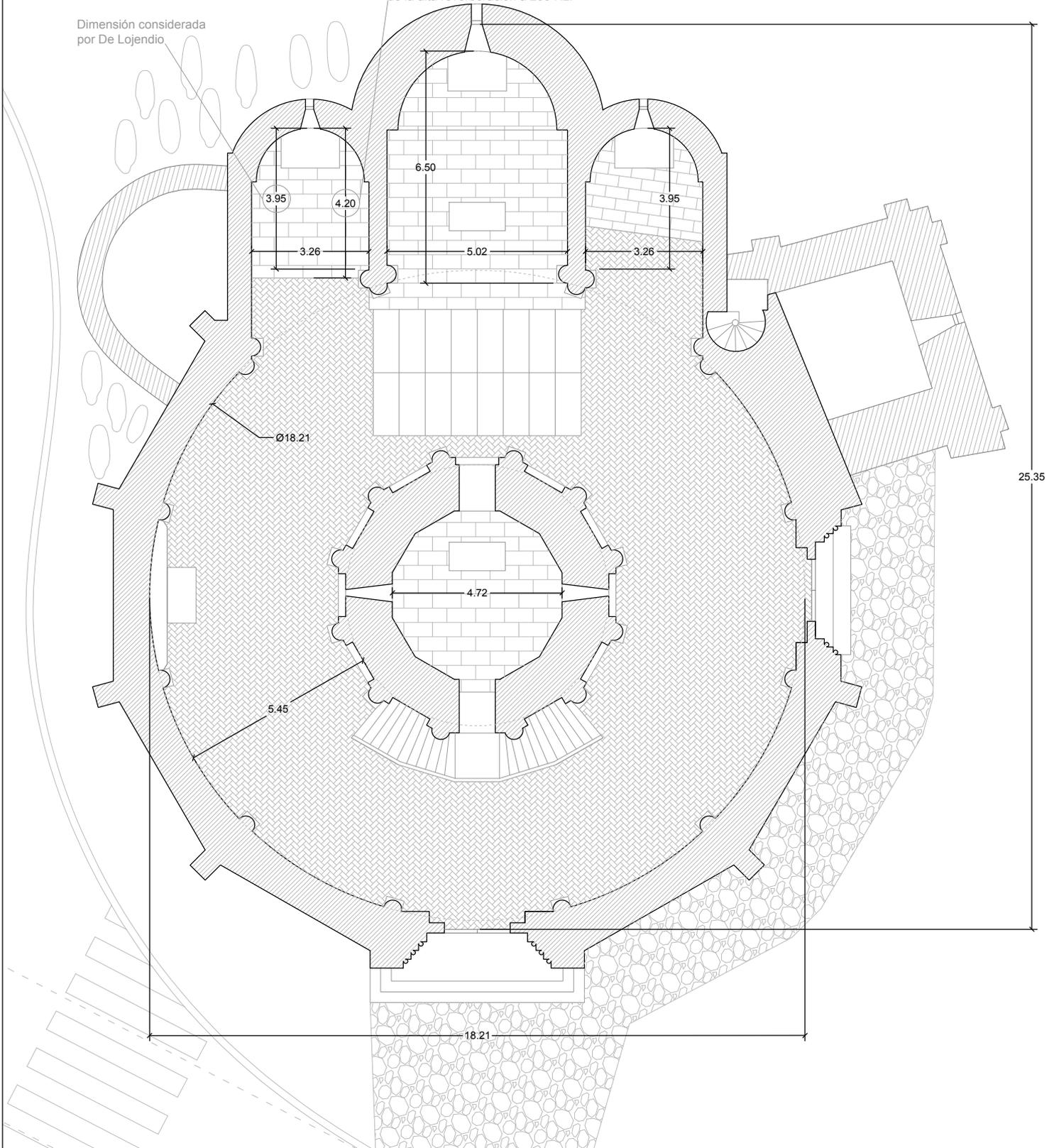


0 1 2 3 5 10 m

 Construcción posterior

Dimensión considerada por De Lojendio

Dimensión real del ábside, causante de la alta reverberación a 200 Hz.



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia

PLANO: Planta con estancia superior del edículo central.

ESCALA: 1/150

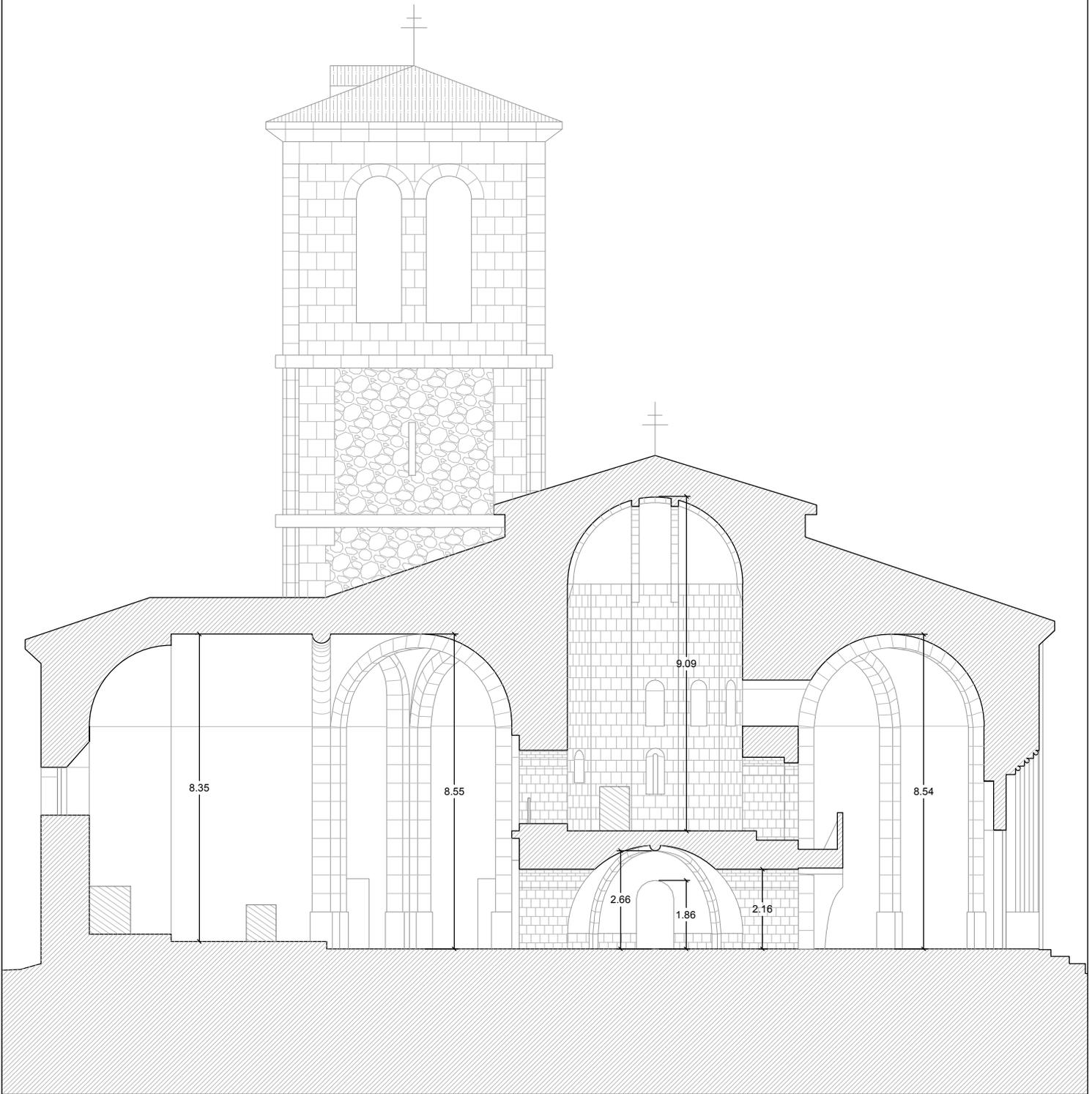
Juan Moreno de Santos

FECHA: 31/08/2015

Firmado:

**Plano nº
3**

0 1 2 3 5 10 m



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia

PLANO: Sección longitudinal, eje este-oeste.

ESCALA: 1/150

Juan Moreno de Santos

**Plano nº
4**

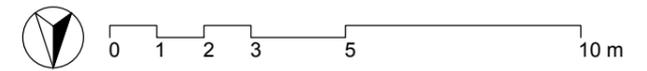
FECHA: 31/08/2015

Firmado:

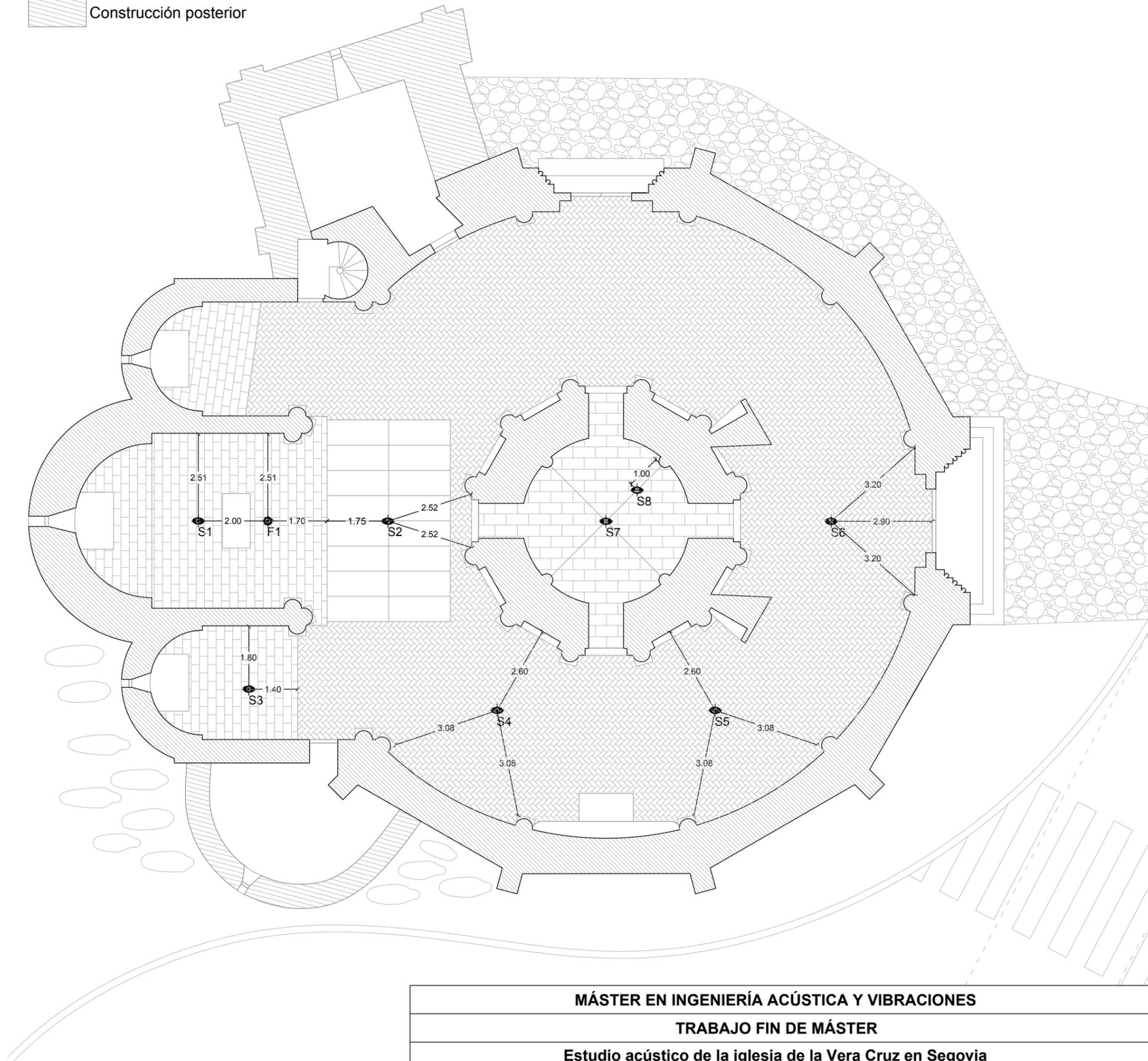
ANEXO VII: GUIONES

Construcción original

Construcción posterior



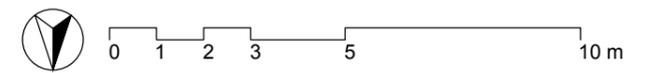
GUION		
Instrumentación		
Fuente		
Omnidireccional (dodecaédrica)		
Modo de funcionamiento:		0 dB
Sonómetro		
SO-LO 01db		
Tiempo de medida (distribución niveles): 10 s.		
Posiciones de medida		
	Distribución de niveles	Tiempo de reverberación
Fuentes		
F1	X	X
F2	X	
Sonómetro		
S1	X	X
S2	X	X
S3	X	X
S4	X	X
S5	X	X
S6	X	X
S7	X	
S8	X	
S9	X	
S10	X	
Procedimiento		
1.- Calibración del sonómetro		
Distribución de niveles		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Realizar la medición en un punto.		
4.- Apagar la fuente.		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
Tiempo de reverberación		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Comenzar a medir con el sonómetro.		
4.- Apagar la fuente (intentando sincronizar al máximo ambas acciones).		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
6.- Calibración del sonómetro		



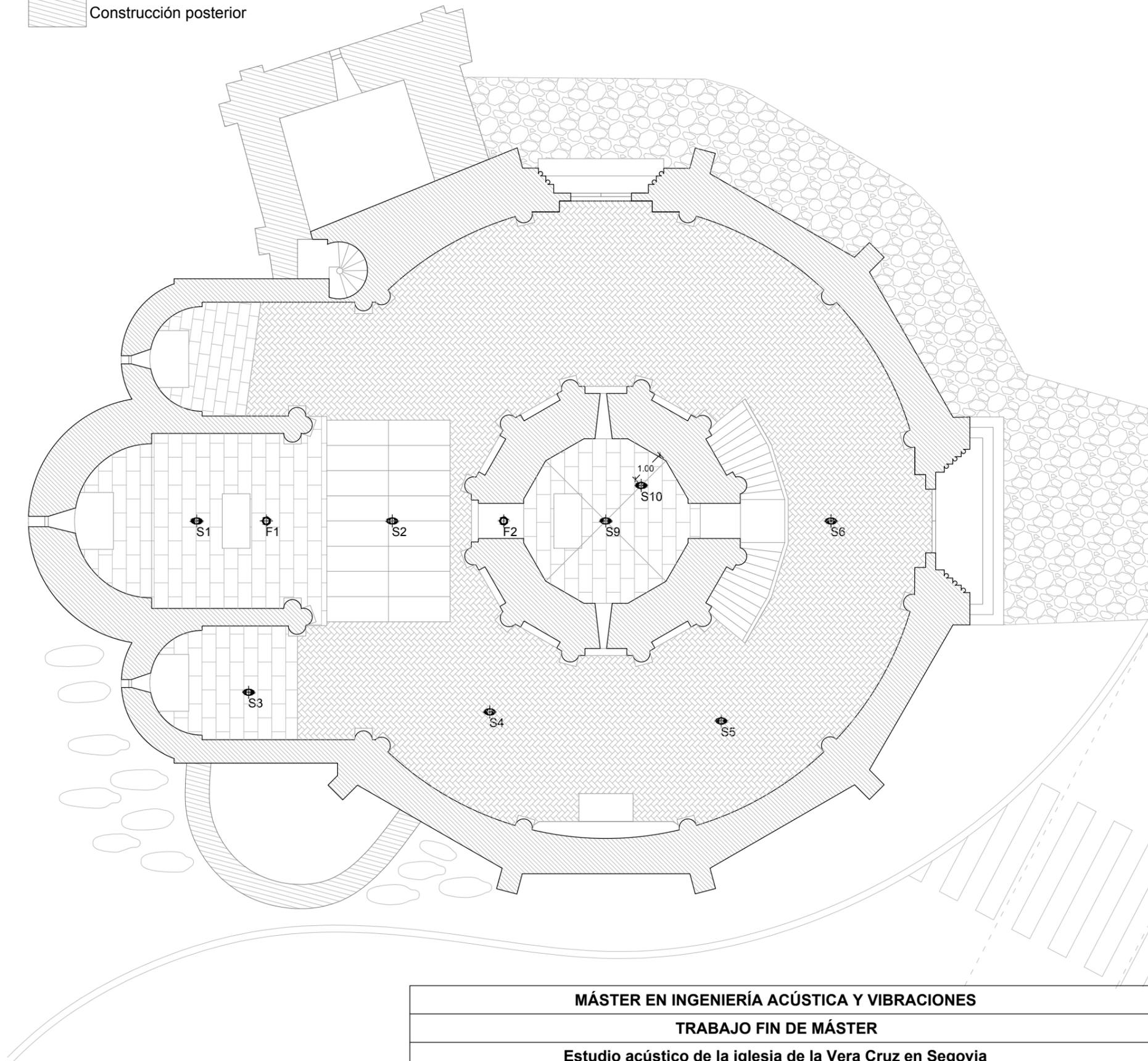
MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES		
TRABAJO FIN DE MÁSTER		
Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia		
PLANO: GUION PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. Planta principal.		
ESCALA: 1/125	Juan Moreno de Santos	Plano nº 5
FECHA: 31/08/2015	Firmado:	

 Construcción original

 Construcción posterior

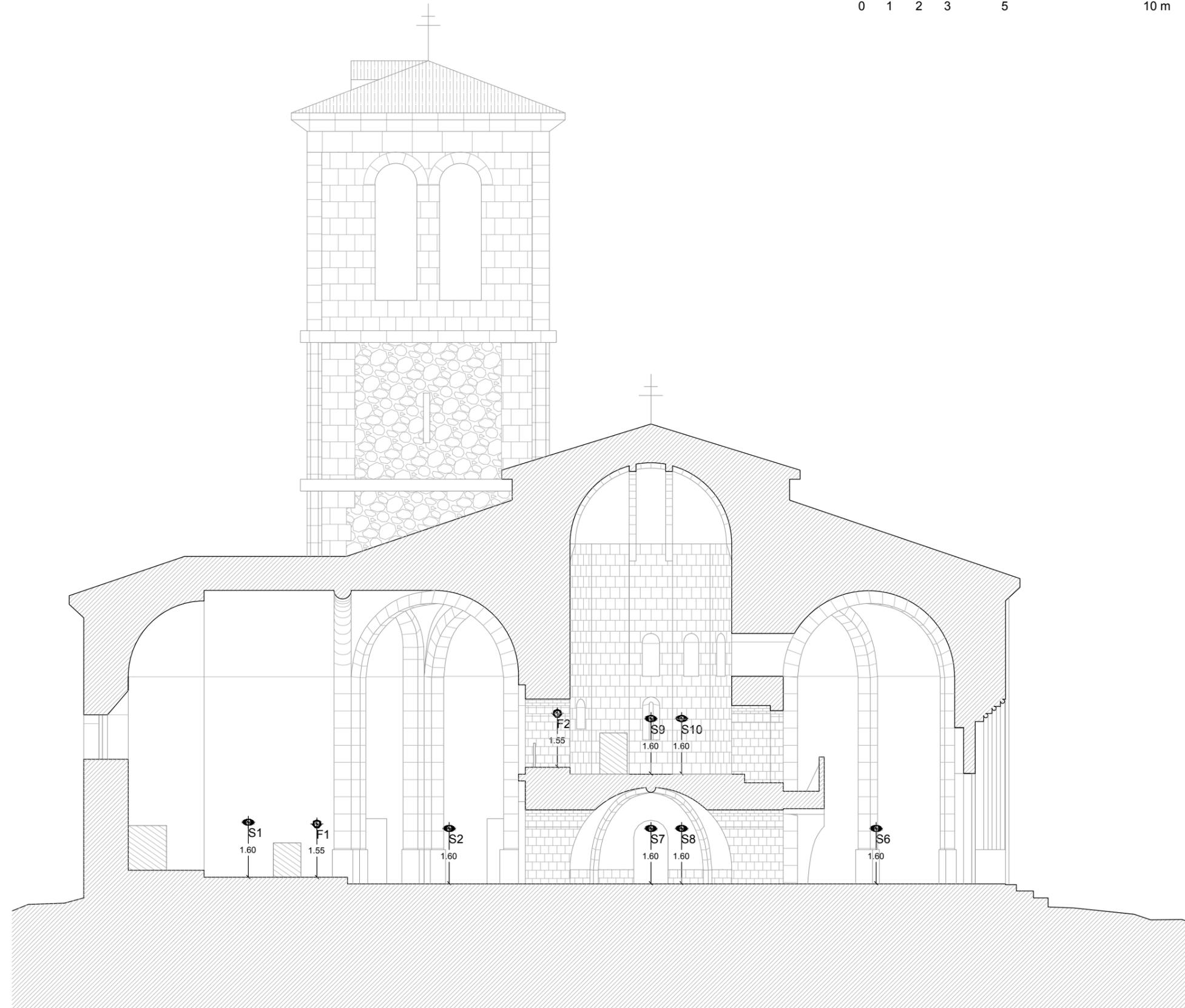


GUION		
Instrumentación		
Fuente		
Omnidireccional (dodecaédrica)		
Modo de funcionamiento:		0 dB
Sonómetro		
SO-LO 01db		
Tiempo de medida (distribución niveles): 10 s.		
Posiciones de medida		
	Distribución de niveles	Tiempo de reverberación
Fuentes		
F1	X	X
F2	X	
Sonómetro		
S1	X	X
S2	X	X
S3	X	X
S4	X	X
S5	X	X
S6	X	X
S7	X	
S8	X	
S9	X	
S10	X	
Procedimiento		
1.- Calibración del sonómetro		
Distribución de niveles		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Realizar la medición en un punto.		
4.- Apagar la fuente.		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
Tiempo de reverberación		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Comenzar a medir con el sonómetro.		
4.- Apagar la fuente (intentando sincronizar al máximo ambas acciones).		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
6.- Calibración del sonómetro		



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES		
TRABAJO FIN DE MÁSTER		
Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia		
PLANO: GUION PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. Planta con estancia superior del edículo central.		
ESCALA: 1/125	Juan Moreno de Santos	Plano nº 6
FECHA: 31/08/2015	Firmado:	

GUION		
Instrumentación		
Fuente		
Omnidireccional (dodecaédrica)		
Modo de funcionamiento:		0 dB
Sonómetro		
SO-LO 01db		
Tiempo de medida (distribución niveles): 10 s.		
Posiciones de medida		
	Distribución de niveles	Tiempo de reverberación
Fuentes		
F1	X	X
F2	X	
Sonómetro		
S1	X	X
S2	X	X
S3	X	X
S4	X	X
S5	X	X
S6	X	X
S7	X	
S8	X	
S9	X	
S10	X	
Procedimiento		
1.- Calibración del sonómetro		
Distribución de niveles		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Realizar la medición en un punto.		
4.- Apagar la fuente.		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
Tiempo de reverberación		
2.- Activar la fuente hasta que el nivel acústico sea estable.		
3.- Comenzar a medir con el sonómetro.		
4.- Apagar la fuente (intentando sincronizar al máximo ambas acciones).		
5.- Desplazarse al siguiente punto de medición y repetir los tres puntos anteriores.		
6.- Calibración del sonómetro		



MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES		
TRABAJO FIN DE MÁSTER		
Estudio acústico de la iglesia de la Vera Cruz en Segovia		
PLANO: GUION PARA MEDICIÓN ACÚSTICA. Sección longitudinal, eje este-oeste.		
ESCALA: 1/125	Juan Moreno de Santos	Plano nº 7
FECHA: 31/08/2015	Firmado:	



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**MÁSTER DE POSTGRADO EN
INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES**

PROYECTO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO ACÚSTICO DE LA IGLESIA DE LA VERA
CRUZ EN SEGOVIA**

Juan Moreno de Santos

Tutor: José Ignacio Sánchez Rivera

VºBº

Valladolid, Septiembre de 2015

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es entender el comportamiento acústico de la iglesia de la Vera Cruz, en Segovia, mediante la simulación digital en CATT Acoustic y, con esto, despejar alguna de las dudas que aún hoy sigue habiendo entorno a ella. Se trata de un templo único y excepcional, ya que se trata de una iglesia cuya planta nace de la simbiosis entre un esquema longitudinal de tres naves y un esquema circular de deambulatorio y estancia central. Su geometría es muy complicada, se trata de una planta dodecagonal a la que se le adosan tres ábsides en el lateral este, siendo el del centro de mayores dimensiones. Además, los lados este y oeste del dodecágono son mayores que los demás, por lo que crea una falsa nave central más amplia.

Las características de su edículo central son también singulares, dado que se divide en dos estancias, una sobre la otra, accediendo a la superior a través de una escalera de doble tiro, para poder hacer procesiones recorriendo el deambulatorio y subiendo y bajando de la estancia; y dejando una estancia inferior de dimensiones extrañas y reducidas que hacen pensar que el suelo original estuviera más bajo del que actualmente existe, siendo así un espacio más amplio y no residual como parece ahora.

Es importante contextualizar el templo no dejándose dominar por las creencias populares. La iglesia es conocida popularmente como “de los Templarios”, pero varios indicios y documentos demostrarían que los verdaderos constructores de la iglesia fueron los Caballeros del Santo Sepulcro, a principios del siglo XIII. Esto es importante para saber qué tipo de ritos y celebraciones se realizarían en dicho templo. Al ser una orden monacal, se realizaban rezos a las horas canónicas y numerosas celebraciones, como el nombramiento de nuevos caballeros o el velado de las armas. Además, se deben conocer otros templos de morfología similar y de la misma época que la iglesia de la Vera Cruz y por ello se analizan otras cinco iglesias icónicas de planta centralizada. Entre ellas la Iglesia del Santo Sepulcro de Jerusalén, que todos los historiadores señalan como la inspiración para todas las iglesias de planta centralizada construidas. De todas las que se han analizado, la iglesia de la Vera Cruz es la que menos modificaciones ha sufrido desde su origen, contando solo con la torre y un ábside añadidos.

Una vez conocida y analizada la geometría de la iglesia, contextualizada y comparada con otros templos similares y sabiendo las celebraciones que se podían llevar a cabo, comienza la parte acústica del trabajo. Esta comienza con una medida *in situ* de parámetros acústicos que sirvieran de base para el modelo digital. La medición no estuvo libre de problemas, ya que la iglesia no se podía cerrar al público y se prolongó más de lo esperado, y que por sus características acústicas, alguno de los sistemas que se

emplearon para medir el tiempo de reverberación no funcionó como se esperaba. No obstante, se obtuvieron concluyentes y sorprendentes.

Se establecieron dos posiciones de emisión, basándose en los ritos que se podían celebrar, una en el ábside principal y otra en la estancia superior del edículo, y diez posiciones de medida, en una mitad de la iglesia –la más alejada de la carretera- puesto que su geometría es simétrica, para caracterizar el comportamiento de los parámetros acústicos a lo largo de toda la superficie.

A la par, se llevó a cabo el modelado en tres dimensiones del templo. Un trabajo muy complicado y laborioso, que hace comprender la dificultad de una construcción de este tipo cuando se hizo. Además debe hacerse con precisión para que minimizar fugas de sonido en el CATT Acoustic. El modelo final cuenta con más de 1200 caras, pero se trata de un modelo muy optimizado, el primer modelo contaba con cerca de 1800 caras.

Una vez que el modelo estuvo terminado, se exporta a CATT Acoustic, no sin dificultades, y se comienza el ajuste del modelo basándose en los resultados obtenidos en las mediciones *in situ*, el tiempo de reverberación, siempre superiores a 2,5 segundos, y los niveles de presión sonora obtenidos. Una vez que el modelo estuvo ajustado, a partir de la aplicación de características materiales a las diferentes caras, comienza la simulación, que verificó los valores de la medición que se llevó a cabo.

Los resultados son sorprendentes. Ambas posiciones de fuente muestran resultados muy similares en todos los parámetros. El nivel de presión sonora en todo el deambulatorio presenta valores muy parecidos, obteniendo mapas acústicos muy homogéneos, que muestra claramente la función acústica de la geometría. Este aspecto se refuerza al observar los ecogramas que se aportan con el trazado de rayos, en los que se observa la gran importancia del sonido reverberado en la recepción total.

Pero esto no es beneficioso para los dos tipos de celebración que se planteaban en un principio, ya que el alto tiempo de reverberación que presenta es idóneo para obtener buenos resultados de claridad musical (C80) pero malos de inteligibilidad de la palabra (STI). Estos resultados se obtienen en la gran mayoría de los puntos de recepción empleados.

Por todo ello las conclusiones extraídas son claras: la geometría tiene una gran participación en la acústica del templo, ambas posiciones de emisión son igual de válidas y el mejor comportamiento se obtiene para emisiones musicales o, al menos, oraciones cantadas que es lo que realizaban los miembros de la Orden.

Estos resultados invitan a pensar que la vía acústica puede desbloquear el análisis y la investigación de algunos recintos en los que no se avance en su conocimiento, pudiendo definir y conocer más el origen, el objetivo y las características de este tipo de iglesia tan diferente que son las llamadas “iglesias-rotonda”.

